ORGANIZADORA
Lilian Coelho de Freitas
INNOVATE:
ENGENHARIA ELÉTRICA
Atena
Editora
Ano 2023

ORGANIZADORA
Lilian Coelho de Freitas
INNOVATE:
ENGENHARIA ELÉTRICA
Atena
Editora
Ano 2023

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

APRESENTAÇÃO

O *e-book* "*Innovate:* Engenharia Elétrica" apresenta resultados de projetos de pesquisa desenvolvidos por professores e estudantes de diferentes instituições educacionais do país. Os capítulos abordam temas como linhas de transmissão de energia elétrica, reconhecimento de fala aplicado **à** sistemas elétricos, dimerização em malha fechada, sistema solar *off grid* para residências rurais, geração de energia elétrica e controladores adaptativos.

Dessa forma, a editora Atena tem a honra de disponibilizar um valioso referencial teórico para estudantes de Engenharia Elétrica que buscam aprofundar seus conhecimentos em tópicos inovadores.

Aos autores, expresso meus sinceros agradecimentos pelas contribuições e pela parceria com a Atena Editora.

Aos nossos leitores, desejo um ótimo estudo!

Lilian Coelho de Freitas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

PROBLEMAS NAS LINHAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉCTRICA EM LUANDA

Baba Eduardo Morais Kubango
Pedro Morais Alberto

https://doi.org/10.22533/at.ed.8412331071

CAPÍTULO 2 8

INOVAÇÕES EM TÉCNICAS DE RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE FALA APLICADAS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Ivan Nunes da Silva
Sofia Moreira de Andrade Lopes
Victor Hideki Yoshizumi
Rogério Andrade Flauzino
Danilo Hernane Spatti
Ivan Gidaro Ricci
Alexandre Gerber Choupina Latorre
Ana Cláudia Carvalho Barquete
Rafael de Oliveira Fernandes
Pedro Hamilton de Sousa

https://doi.org/10.22533/at.ed.8412331072

CAPÍTULO 3 31

LUMINÁRIA DE BANCADA EM LED COM DIMERIZAÇÃO EM MALHA FECHADA

Nadson Vieira dos Santos
Alam Ribeiro da Silva
Geoziel Nascimento da Silva Junior
Orleans Mendonça Cardoso

https://doi.org/10.22533/at.ed.8412331073

CAPÍTULO 4 50

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR OFF GRID EM UMA RESIDÊNCIA RURAL

Elielton Christiano de Oliveira Metz
Julio Correia
Luciana Paro Scarin Freitas

https://doi.org/10.22533/at.ed.8412331074

CAPÍTULO 5 64

HIDRELÉTRICA: EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO

André Luís Freitas de Lima
Ewerton Castro Pinheiro de Lima
Flávio Alves Ferreira
Ivanilson Alves Montes
Marcos Aurélio Ferreira de Souza
Matheus Martins Feliciano

Nathalia Pimentel

https://doi.org/10.22533/at.ed.8412331075

CAPÍTULO 6 75

ARQUITETURAS E TOPOLOGIAS DE CONTROLADORES ADAPTATIVOS, FUZZY-PID E FCM-PID EM FERMENTADOR ALCOÓLICO INDUSTRIAL

Márcio Mendonça
Emerson Ravazzi Pires da Silva
Ricardo Breganon
Matheus Gil Bovolenta
Marcos Antônio de Matos Laia
Bruno Oliveira Rosa
Rodrigo Rodrigues Sumar
Vicente de Lima Gongora
Carlos Alberto Paschoalino
Michelle Eliza Casagrande Rocha
Andre Luis Shiguemoto
Kazuyochi Ota Junior
Andressa Haiduk
Janaína Fracaro de Souza Gonçalves
Marcio Aurélio Furtado Montezuma
Ângelo Feracin Neto

https://doi.org/10.22533/at.ed.8412331076

SOBRE A ORGANIZADORA 89

ÍNDICE REMISSIVO 90

PROBLEMAS NAS LINHAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉCTRICA EM LUANDA

Data de aceite: 03/07/2023

Baba Eduardo Morais Kubango
Universidade Agostinho Neto, M.Sc.Eng
Prof. Auxiliar, Luanda, Angola

Pedro Morais Alberto
Universidade Técnica de Angola, Instituto Superior Politecnico do Cazenga, M.Sc. Eng., Prof. Auxiliar, Luanda, Angola

RESUMO: As linhas de transporte (LT) de energia eléctrica têm uma grande importância no sistema electroenergético, pós elas permitem o transporte da mesma, desde a geração (centrais eléctricas) até os grandes centros de consumo (cidedes), passando inicialmente por uma subestação elevadora, seguindo – se outras e no final uma subestação abaixadora. Atendendo a esta tamanha importância, no presente trabalho abordaremos alguns dos problemas que estas apresentam contretamente na cidade de Luanda, tás como cruzamento entre linhas uma por cima da outra, linhas com pouca altura atravessando estradas, linhas atravessando pontes, número de isoladores por cadeias não unificados em função da tensão nominal da linha e encontrar soluções para os mesmos, como por exemplo a maneira adecuada e correcta para a escolha do número de isoladores em cadeias. Nas estradas, pontes ou aeroportos as LT devem ser transformadas em linhas subterrâneas.

PALAVRAS-CHAVE: LT, MT, AT, MAT, energia eléctrica, isolador, cadeia.

INTRODUÇÃO

O conforto das populações a nível mundial, em grande parte, depende da energia eléctrica. Os centros de consumo geralmente se encontram distantes dos centros de geração, daí a necessidade de construção de LT, para o transporte e distribuição da energia eléctrica gerada. A grande necessidade para a correcção de certos aspectos nestas linhas na Província de Luanda, motivam o desenvolvimento de temas desta natureza.

Tal como em outras paragens do mundo, na cidade de Luanda, podemos encontrar Linhas de Transporte de MAT ($U_{Nom.}$≥110 kV), AT (110> $U_{Nom.}$≥60 kV) e MT (60> $U_{Nom.}$≥15 kV). As de MAT e MT, geralmente são usadas para o transporte de energia eléctricas a longas distâncias

(entre localidades). Já as de MT, servem para o transporte de energia eléctrica em MT, assim como a distribuição de energia eléctrica também em MT.

Linha de transporte Aérea, é a linha destinada para o transporte e distribuição de energia eléctrica em conductores, colocados ao ar livre e suportados com o auxílio de postes e isoladores.

Principais elementos de uma LT: postes, conductores, armaduras lineares e isoladores.

Segundo [3], a posição teórica de encastramento é definida pelo comprimento de encastramento (ou profundidade de enterramento) H1, estabelecido na tabela:

Altura total do poste, H (m)	Comprimento de Encastramento, H1(m)
H≤14	H1=0,1xH+0,5
16, 18 ou 20	2,0
22 ou 24	2,5
26 ou 36	2.8

Tabela 1 - Profundidade de enterramento

Figura 1. Implantação do poste em betão

Figura 2. Montagem da linha

Por exemplo [4], para implantar o poste de betão (figura 1), inicialmente abre – se uma cova com o devido encastramento, depois põe – se na cova o poste e colocamos em volta do mesmo pedras grandes, para mante – lo em pé no lugar. Depois, prepara – se a massa de betão e manda – se para a cova. Após 3 ou mais dias, com o betão já curado, pode – se iniciar a equipar os postes, como se vê na figura 2.

A energia eléctrica é um bem essencial que deve ser transportado racionalmente de modos a evitar com que boa parte da mesma se perca no transporte e não cumprindo com os reais objectivos, que é leva – la aos centros de consumo com mínimo possível de perdas. Sendo assim, sugerimos o uso da tabela 1, de acordo com [2] , para que no âmbito da projecção de uma linha de transmissão seja tido em conta o critério tridimensional envolvendo as grandezas (tensão, potência e distância).

Tensão, kV	Potência máxima transmitida, MW	Distância máxima de transmissão, km
0,38	0,05 – 0,15	0,5 – 1,0
10	2,0 – 3,0	10 – 15
35	5 – 10	30 – 50
110	25 – 50	50 – 150
150	40 – 70	100 – 200
220	100 – 200	150 – 250
330	200 – 300	300 – 400
500	700 – 900	800 – 1200

Tabela 2 - Raciocínio económico de uma linha de transmissão em corrente alternada

Com muita frequência tem se notabilizado os seguintes problemas, nas linhas de transporte de energia eléctrica, em Luanda:

- Linhas com baixa altura, atravessando estradas de muito movimento rodoviário.
- Cruzamento entre linhas.
- Isoladores quebrados em linhas.
- Número de pratos em cadeia não padronizado.
- Elevada poluição sonora, nas linhas de AT e MAT.

Figura 4. LT muito baixa, atravessando a via expressa

Figura 5. Estrada sendo atravessada por LT de MT com 12 m e LT de AT 22 m

Na figura 4, vê – se uma linha de MT atravessando a via expressa (Fidel de Castro Ruz) com tão pouca altura, o que obrigaria fazer – se uma baixada.

Já na figura 2, observa – se a estrada Camama-Kilamba, a ser atravessada por duas LTs, uma de MT com poste em betão de 14 m de altura, e outra de AT com poste metálico de 22 metros de altura. Sobretudo o de MT, possui tão pouca altura o que obrigaria também uma baixada.

Nas figuras 6,7 e 8, vê – se o cruzamento de LTs. Na figura 8, vê – se as LTs a atravessarem a ponte Camama-Kilamba. Em todos estes casos recomenda – se a

execussão de baixadas, mas através dos elevados custos perfere – se arriscar.

Na figura 9 observa – se uma das cadeias de isoladores (do meio), completamente sem pratos, pelo que se recomenda intervenção urgente na mesma a fim de colocarem uma nova cadeia de isoladores e aferir a condição das cadeias aí existentes.

Figura 6. Cruzamento de LT 60 kV e 220 kV

Figura 7. Cruzamento de LT 60 kV e 30 kV
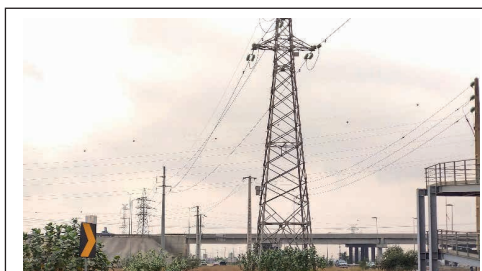
Figura 8. LTs atravessando a ponte Cama - Kilamba

Figura 9. LT com cadeia de isoladores sem pratos (Lar do Patriota)

O número de pratos nas cadeias de isoladores, deve ser uniformizado de modos a facilitar a identificação do tipo de linha quanto a tensão nominal. Para tal, como se pode ver na tabela 3, de acordo com [1] , para linha de 15 kV devemos utilizar na cadeia dois pratos apenas, já nas de 30 kV é que devemos utilizar 3 pratos.

Grau de poluição atmosférica	Tensão, kV, em um isolador na linha em tensão nominal, kV								
	6	10	20	35	110	220	330	500	750
1	1	1	2	3	6	12	18	25	39
2	1	1	2	3	7	15	19	27	42
3	1	1	2	3	8	16	20	30	48
4	1	1	3	4	10	20	25	35	60
5	2	2	3	4	10	20	28	40	60
6	2	2	4	5	12	24	34	49	72
7	2	2	4	6	15	29	40	59	87

Tabela 3 - Número médio de isoladores nas LTs para vários graus de poluição atmosférica

Para se ter noção, a potência entregue a um isolador, calcula – se pela formula, kW:

$$P_{iso} = \frac{U_{iso}^2}{R_{iso}},$$

Onde U_{isol} – tensão, no isolador, kV;

R_{iso} – sua resistência, kΩ.

Grau de poluição atmosférica	Tensão, kV, em um isolador na linha em tensão nominal, kV								
	6	10	20	35	110	220	330	500	750
1	3,5	5,8	5,8	6,7	10,6	10,6	10,6	11,6	11,2
2	3,5	5,8	5,8	6,7	9,1	8,5	10,0	10,7	10,4
3	3,5	5,8	5,8	6,7	7,9	7,9	9,5	9,6	9,0
4	3,5	5,8	3,8	5,1	6,4	6,4	7,6	8,2	7,2
5	1,8	2,9	3,8	5,1	6,4	6,4	6,8	7,2	7,2
6	1,8	2,9	2,9	4,0	5,3	5,3	5,6	5,9	6,0
7	1,8	2,9	2,9	3,4	4,2	4,4	4,8	4,9	5,0

Tabela 4 - Valor da tensão, em um isolador

Figura 10. Poste de AT, 60 kV inclinado

Figura 11. Baixada, para a LT de 30 kV atravessar a pedonal

Na figura 10, o poste metálico de AT, encontra – se inclinado, deve – se avaliar as causas e corrigir – se urgentemente o defeito. A principio trata – se de uma zona em que no tempo chuvoso acumula – se muita água.

Já na figura 11, observa – se a baixada de uma LT de MT, que foi feita para atravessar um obstáculo (pedonal), o que se recomenda apesar dos custos elevados que representam.

Um dos grandes problemas, do dia a dia nas LT de MT e AT, tem sido a poluição sonora por elas transmitida. A principio isto da – se devido o efeito Corona, causada pela movimentação do campo eléctrico em volta dos conductores. Este campo electriza o vento em volta do conductor, cria electrões livres, que por sua vez ionizam as moleculas do vento, e por sua vez estas geram as descargas por Corona. Que em 1 segundo acendem e apagam 100 vezes em volta do conductor, sendo assim o ar próximo do conductor aquece – arrefece, engorda – emagrece.

A leitura termográfica de uma LT com o auxílio de um termovisor, nos permite avaliar a temperatura da LT, definindo se encontra – se em temperatura normal de funcionamento, ou em sobreaquecimento e dar as devidas recomendações.

CONCLUSÕES

- Não se deve permitir cruzamento entre LTs;
- Perferencialmente nas estradas, pontes e aeroportos as LTs devem ser transformadas em subterrâneas;
- O número de pratos em cadeias de isoladores, deve ser unificado em função do nível de tensão e em casos raros, em função do nível de poluição também;
- Quando se projectar uma LT deve – se escolher racionalmente o nível da tensão de transporte em função da distância e da potência;
- A grande desvantagem na utilização de postes de madeira deve – se ao perigo de incêndio nas imediações do poste;
- Recomenda – se para LTs com elevado nível de tensão a utilização de postes metálicos e em betão, embora que para as tensões mais mortas como nas cidades, assim como nas zonas rurais, o mais racional é o uso de postes de madeira;
- Por outra, recomendamos que de tempo em tempo (em função de um gráfico elaborado pela equipa responsável), as linhas sejam observadas: Número de isoladores por cadeias e seus estados; procura de descontinuidade em termos físicos; leitura termográfica em vários pontos da linha.

REFERENCIAS

1. Yu.S. Jelezko, A.V. Artemiev, O.V. Savchenko. Cálculos, Análise e Normalização de Perdas de Energia Eléctrica em Redes Electricas. Moscovo <<Editora NTs ENAS>>, 2006.

2. A.A. Gueracimenko, V.T. Fedin. Transporte e Distribuição de Energia Eléctrica. Rostov On Don, FENICS, 2006.

3. Catálogo ACAIL, Postes em Betão.

4. B.E.M. Kubango. Distribuição de energia eléctrica em Média Tensão na República de Angola. Conferência Internacional Tecnico-Científica. Belgorod 27 de Agosto de 2020.

INOVAÇÕES EM TÉCNICAS DE RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE FALA APLICADAS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Data de submissão: 09/06/2023 *Data de aceite: 03/07/2023*

Ivan Nunes da Silva
Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
http://lattes.cnpq.br/0448891472280429

Sofia Moreira de Andrade Lopes
Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
http://lattes.cnpq.br/1277390036356439

Victor Hideki Yoshizumi
Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
http://lattes.cnpq.br/8378904835843389

Rogério Andrade Flauzino
Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
http://lattes.cnpq.br/ 4487681434814567

Danilo Hernane Spatti
Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
http://lattes.cnpq.br/7371885828178292

Ivan Gidaro Ricci
ARGO Transmissão de Energia S/A
São Paulo – SP
http://lattes.cnpq.br/6397604500437134

Alexandre Gerber Choupina Latorre
ARGO Transmissão de Energia S/A
São Paulo – SP
http://lattes.cnpq.br/1515823301911325

Ana Cláudia Carvalho Barquete
ARGO Transmissão de Energia S/A
São Paulo – SP
http://lattes.cnpq.br/0533920838682298

Rafael de Oliveira Fernandes
ARGO Transmissão de Energia S/A
São Paulo – SP
http://lattes.cnpq.br/8600035078363689

Pedro Hamilton de Sousa
ARGO Transmissão de Energia S/A
São Paulo – SP
http://lattes.cnpq.br/0293405061704436

RESUMO: Sistemas de reconhecimento automático de fala têm grande importância na literatura, sendo aplicados em diversas áreas, como medicina e cibersegurança. As técnicas utilizadas para compor tais sistemas têm sido também aprimoradas,

de forma que o uso de técnicas de *deep learning* tem se tornado cada vez mais popular. A massiva aplicação deste tipo de sistema para a solução de problemas em diversas áreas tem relação com a sua capacidade de identificar, reconhecer e extrair informações da fala, sendo este o principal modo de comunicação do ser humano. Todavia, a aplicação deste tipo de sistema e de todas as suas potencialidades ainda é tímida no contexto de sistemas elétricos de potência. Assim, este trabalho tem como objetivo reunir e analisar os estudos inovadores e proeminentes na área de sistemas elétricos de potência que utilizam técnicas de reconhecimento automático de fala. Os trabalhos foram analisados de forma comparativa e suas principais características foram detalhadas. Espera-se que este trabalho de investigação sirva de ferramenta para estimular o desenvolvimento de novos estudos na área.
PALAVRAS-CHAVE: Reconhecimento de fala, processamento de fala, sistemas elétricos de potência, aprendizagem de máquinas.

INNOVATIONS IN AUTOMATIC SPEECH RECOGNITION TECHNIQUES APPLIED TO ELECTRICAL POWER SYSTEMS

ABSTRACT: Automatic speech recognition systems have great importance in the literature, being applied in several areas, such as medicine and cybersecurity. The techniques used to compose such systems have also been improved, so that the use of deep learning techniques has become increasingly popular. The massive application of this type of system for solving problems in several areas is related to its ability to identify, recognize and extract information from speech, the main mode of communication of human beings. However, the application of this type of system and all its potential is still timid in the context of electrical power systems. Thus, this work aims to gather and analyze innovative and prominent studies in the area of electrical power systems using automatic speech recognition techniques. The works were analyzed in a comparative way and their main characteristics were detailed. It is expected that this investigation work will serve as a tool to stimulate the development of new studies in the area.
KEYWORDS: Speech recognition, speech processing, electric power systems, machine learning.

1 I INTRODUÇÃO

Sistemas de Reconhecimento Automático de Fala (*Automatic Speech Recognition* – ASR) se baseiam no processo de captação de um sinal de áudio, proveniente da fala do interlocutor, na identificação e reconhecimento das palavras enunciadas e na extração de informações para o uso posterior, a fim de realizar alguma ação ou atividade. Este tipo de sistema é popular em diversas aplicações, pois a fala é a forma de comunicação mais natural e eficiente realizada entre os seres humanos. Usualmente, o processo de identificação e reconhecimento de palavras realizado pelos sistemas se baseia na tecnologia de transcrição de fala para texto (*speech-to-text*), sendo este outro tema frequente de estudos (MALIK *et al.*, 2021).

Devido à sua importância, diversos trabalhos foram desenvolvidos propondo a aplicação de sistemas de ASR nas mais diversas áreas de conhecimento. Artigos de

revisão sobre o tema também são comuns, tais como Malik *et al.* (2021), Vadwala *et al.* (2017) e Oshikawa *et al.* (2018). Durante as buscas nas principais plataformas científicas disponíveis, foram então encontrados diversos artigos na área de reconhecimento de voz utilizando as palavras chave "*speech recognition*" e "*speech-to-text*". Usualmente, tais artigos estão relacionados com aplicações em medicina (NEDJAH *et al.*, 2022; ALNASSER e AL-GHOWINEM, 2019), tradução (VENKATASUBRAMANIAN e MOHANKUMAR, 2022; ZHANG, 2022), jogos online (LELARDEUX *et al.*, 2017), segurança cibernética (PÉREZ *et al*, 2021), entre outros. Todavia, nota-se uma carência de artigos que utilizam a tecnologia de reconhecimento de voz em aplicações de Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

Embora existam diversos problemas que podem ser abordados utilizando sistemas de ASR no contexto de SEP, poucos estudos apresentam destaque na área, sendo a maioria desenvolvida por grupos de pesquisa chineses (JIANGPING *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2021; YU *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019). No Brasil a permissão para o uso de teleassistência no contexto do sistema interligado nacional foi permitida a partir de 2019, pela resolução normativa nº 864 publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); contudo, tal normativa foi revogada e substituída pela resolução Nº 1.005, de 15 de fevereiro de 2022 (ANEEL, 2022). Com esta mudança regulatória, algumas pesquisas foram então desenvolvidas, mas a maior parte dos desenvolvimentos no país ainda se encontra em estágios iniciais de pesquisa (SOUZA *et al.*, 2021; JORGE *et al.*, 2010).

No contexto de SEP, inúmeras aplicações para ASR podem ser verificadas. As atividades que devem ser realizadas pelos operadores nos centros de operação são normalmente repassadas para eles por meio de comandos de voz via chamadas telefônicas, como a comunicação dos comandos de operação e despacho de energia que ocorre entre o operador e a agência reguladora, por exemplo. Desta forma, os operadores precisam lidar com altas cargas de trabalho em forma de instruções faladas. Este processo está sujeito a diversas falhas, tais como erros de pronúncia e linhas telefônicas ocupadas. Além disso, as operações do dia a dia de um sistema de operação são complexas e exaustivas, sendo que podem afetar negativamente o desempenho dos funcionários, o que pode então ocasionar falhas, levando-se assim a problemas de segurança (XIANG *et al.*, 2021). Ademais, quando há a ocorrência de alguma falha, o número de instruções recebidas via comandos de voz aumenta exponencialmente, o que eleva então a possibilidade de erros humanos, colocando-se também em risco a segurança do sistema (YU *et al.*, 2020).

Quando há a ocorrência de algum incidente ou falha na operação da planta ou na comunicação, torna-se necessário realizar um processo de auditoria das informações repassadas nas chamadas telefônicas. Por este motivo, os engenheiros responsáveis devem então ouvir uma grande quantidade de horas de gravação para determinar e identificar o que aconteceu e ocasionou a falha. Porém, durante este processo, muito material irrelevante, no formato de arquivos de áudio, é analisado (ZHANG *et al.*, 2021).

Com efeito, sistemas de ASR poderiam ser utilizados para realizar a análise inteligente das informações contidas nos arquivos de áudio, visando-se determinar quais são relevantes de serem monitoradas a fim de indicar o funcionamento da rede. (XIANG *et al*., 2021).

Ainda em relação à análise sistemática das informações presentes nas chamadas telefônicas realizadas nos centros de operação, é possível formar um banco de informações com dados históricos sobre a segurança da rede contendo as falhas e problemas identificados em sua operação. O uso de tecnologias como as de transcrição de fala para texto permite analisar sistematicamente este tipo de dados, padronizando, rotulando e classificando as informações para uso posterior (YU *et al*., 2020).

Dentre os estudos analisados na área, verificou-se também a aplicação de sistemas de ASR para auxiliar nos procedimentos de notificação de segurança em subestações. Tais procedimentos são relativos ao processo de leitura de um código de conduta segura, por parte do supervisor, para os funcionários antes de alguma operação na subestação, a fim de alertar e assim evitar possíveis riscos. Dada a importância deste procedimento, é vital que o supervisor leia de forma completa os procedimentos de segurança. Todavia, atualmente não há uma forma automática de assegurar que os procedimentos foram explicados completa e corretamente, pois esta supervisão depende da análise humana, a qual pode também levar a erros (LI *et al*., 2020).

Além de verificar as principais aplicações de sistemas de ASR no contexto do SEP, a análise dos artigos presentes na literatura também permitiu identificar os principais desafios presentes neste tipo de aplicação. Dentre tais desafios destaca-se a presença de ruído sonoro característico neste tipo de ambiente, como subestações. Além disso, a garantia no nível de precisão no processo de reconhecimento de fala, dentro de um contexto de operação, exige alto grau de acurácia nos processos (JORGE *et al*., 2010).

Outro problema relatado relaciona-se com o fato das instruções sobre despacho de energia usualmente conterem nomes de entidades do sistema elétrico, o que agrega uma maior dificuldade de reconhecimento por parte dos sistemas de identificação de fala, devido à falta de base de dados. Desta forma, devido à alta presença de nomes próprios de entidades em instruções sobre despacho de energia, normalmente é então necessário realizar o pré-treinamento do modelo de linguagem construído para as instruções de despacho de energia (JIANGPING *et a*l., 2021).

Tais desafios vêm sendo abordados na literatura correlata. Apesar disso, ainda não se verificou estudos que apliquem um sistema completo de ASR no contexto de SEP. Tendo em vista a escassez de trabalhos sobre o tema, este capítulo tem como objetivo destacar e analisar comparativamente os principais trabalhos desenvolvidos na área de SEP utilizando técnicas de ASR. Serão avaliados os métodos utilizados por cada autor e os níveis de acurácia obtidos. Além disso, serão destacados os principais desafios sobre o tema e abordagens para contorná-los. Por fim, serão propostas sugestões para trabalhos futuros. Assim, espera-se que este estudo sirva como motivação e guia para o desenvolvimento

desta área de pesquisa, tendo-se em vista que não foram verificados na literatura artigos de revisão que tratem deste contexto de aplicação, apesar de sua importância.

Este trabalho está dividido em 5 seções. A primeira seção é a presente, a qual contém a introdução ao tema e ao estudo. A segunda seção apresenta os principais conceitos sobre as técnicas de reconhecimento automático de fala. A Seção 3 fornece uma análise sobre o estado da arte de técnicas de ASR aplicadas no contexto de SEP. Análises comparativas sobre os trabalhos de destaque na literatura são descritas na Seção 4. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho, sintetizando o estado da arte do tema de ASR aplicado a SEP, além de discutir também sobre motivos para a ainda tímida aplicação de tais técnicas neste contexto e sugerir ainda abordagens para incentivar mais estudos.

2 I TÉCNICAS DE RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE FALA

Classificada como uma característica exclusiva do ser humano, a voz concretiza a necessidade de verbalizar pensamentos e permite que o indivíduo compartilhe informações a partir da comunicação oral (CUERVO, 2010; SANTOS, 2015). Dada a importância de tal habilidade no cotidiano das pessoas, tem-se buscado desenvolver máquinas capazes de produzir e entender a voz humana, fazendo-se com que a comunicação vocal homem-máquina ganhe destaque no campo da comunicação por voz.

A interação com sistemas automáticos a partir da utilização da voz possui diversas aplicações que serão exploradas ao longo deste estudo e se mostra vantajosa em diversos cenários, tais como nos casos em que o operador não pode usar suas mãos livremente, quando não é possível ou conveniente a adição de um teclado no ambiente, quando é necessário ter maior mobilidade durante o processo de entrada de dados em um sistema, em situações nas quais o processo deve ser controlado em tempo real, quando o operador deve manter o olhar em um ponto fixo, e quando a robustez e segurança operativa podem ser aprimoradas a partir da garantia de redundância no processo.

O campo da comunicação vocal homem-máquina inclui três tipos de comunicação: sistemas de resposta vocal, sistemas de reconhecimento de locutor e sistemas de reconhecimento de fala. O primeiro tipo consiste em sistemas com capacidade de responder a solicitações de informações com mensagens de voz. Esses sistemas, portanto, transmitem o som em uma única direção, da máquina para o usuário.

Para problemas de reconhecimento de locutor, a tarefa do sistema é verificar a identidade de um locutor específico ou identificar um locutor particular de um determinado conjunto de falantes candidatos. No primeiro caso, o locutor sempre quer ser reconhecido pelo sistema e, portanto, é definido como cooperativo. No segundo caso, o locutor é definido como não cooperativo porque geralmente não quer ser reconhecido pelo sistema, como em aplicações voltadas para a área de criminalística.

A tecnologia de verificação de locutor é semelhante à tecnologia de reconhecimento de fala, o que torna atraente combinar as duas tecnologias no mesmo hardware para aplicações específicas (COSTA, 1994). A terceira abordagem, relacionada com sistemas de reconhecimento de fala, será detalhada a seguir.

2.1 Sistemas de Reconhecimento de Fala

O reconhecimento de fala é um processo importante para simplificar a comunicação homem-máquina, sendo um procedimento que permite aos usuários usar comandos de voz que são reconhecidos e interpretados por sistemas de reconhecimento automático de fala.

A tarefa básica de um sistema de reconhecimento de fala é reconhecer com precisão uma frase falada completa, ou "entender" uma expressão falada (ou seja, responder de forma correta ao que foi falado). O conceito de compreensão, ao invés de reconhecimento, é muito importante para sistemas que lidam com entrada de fala contínua de grande vocabulário, enquanto o conceito de reconhecimento preciso é crítico para sistemas com palavras únicas, vocabulários limitados e baixo número de usuários (RABINER, 1976).

O problema do reconhecimento de fala pela máquina está relacionado à estrutura complexa da voz humana e depende de diversos fatores, como características vocais, entonação, velocidade de fala, estado emocional do usuário, entre outros. Os métodos de reconhecimento de fala podem ser classificados de acordo com o tamanho e a flexibilidade do vocabulário, número de usuários, condições de fala e assim por diante (COSTA, 1994). Em geral, todos os tipos de sistemas de reconhecimento automático de voz podem ser atribuídos a uma das seguintes categorias: sistemas de reconhecimento de palavras isoladas, sistemas de reconhecimento de palavras conectadas, sistemas de reconhecimento dependente do locutor, e sistemas de reconhecimento independente do locutor.

Os sistemas de reconhecimento de palavras isoladas podem ser definidos como aqueles que necessitam de uma pequena pausa antes e depois da sentença que deve ser reconhecida (GU *et al.*, 1991). A duração mínima das pausas separando amostras independentes deve ser da ordem de 100 milissegundos. Intervalos de tempo menores que 100 milissegundos podem ser confundidos com pequenas pausas criadas pela presença de uma consoante oclusiva no meio de uma palavra (MARTIN, 1976).

Para sistemas de reconhecimento de palavras conectadas, o modo de entrada de palavras é mais conveniente para os usuários, pois se aproxima da forma natural de falar do ser humano. Contudo, devido ao nível atual da tecnologia de reconhecimento de fala, esse método de comunicação tem algumas limitações. Além disso, a entrada de palavras conectadas não equivale à fala contínua com um vocabulário de milhares de palavras, de modo que os usuários não se comunicam com o sistema da mesma forma que se comunica com outros indivíduos. Este modelo de sistema pode ser utilizado de forma eficaz em aplicações nas quais um grupo restrito de usuários pode ser instruído sobre como operar

o sistema (UNNIKRISHNAN *et al.*, 1991; BROWN *et al.*, 1991). Para intervalos curtos de palavras conectadas, taxas de fala de mais de 300 palavras por minuto podem ser então alcançadas (MARTIN, 1976).

Os sistemas dependentes do locutor são caracterizados por serem treinados para seguir as características de fala específicas de um usuário. Uma vantagem desta abordagem é seu vocabulário de centenas de palavras, que é definido e criado pelo usuário, além da facilidade com a qual esse vocabulário pode ser modificado e atualizado. Todavia, a principal desvantagem desses sistemas é a necessidade de treiná-lo para cada usuário, o que pode tornar a abordagem proibitiva se houver a necessidade de um grande vocabulário e um elevado número de usuários. Além disso, o desempenho é sensível às mudanças na voz do usuário devido ao estresse, fadiga, rouquidão, etc. O desempenho de um sistema de reconhecimento de fala de alta qualidade (fala contínua) é de cerca de 90% em condições laboratoriais bem definidas (HUANG, 1992). No entanto, a avaliação de dispositivos reais de reconhecimento de fala depende da aparência de palavras semelhantes, do estado físico e emocional do locutor, do tipo e posição do microfone e do ruído ambiente.

Por fim, sistemas de reconhecimento independentes do locutor podem ser definidos como aqueles que não estão vinculados a nenhuma característica particular da fala de um usuário. Sua principal característica é oferecer desempenho de reconhecimento aceitável para um grande número de usuários. No entanto, este tipo de sistema não funciona de maneira uniforme para todos os locutores, especialmente quando estes possuem diferentes sotaques, gêneros, dialetos, ou até mesmo comportamentos distintos de fala. Usualmente, o vocabulário desses sistemas é fixo e muito menor do que o dos sistemas que são dependentes do locutor. Além disso, como o vocabulário deve ser gerado pelo fabricante, a sua atualização torna-se então um tanto custosa. Assim, sistemas de reconhecimento dependentes do locutor devem ser geralmente usados quando a identificação do locutor e a modificação do vocabulário de aplicação são necessárias (SAMBUR e RABINER, 1975).

2.2 Arquitetura de Sistemas de Reconhecimento Automático de Fala

Os atuais sistemas de reconhecimento contínuo de fala se baseiam no princípio do reconhecimento estatístico de padrões, no qual os sinais acústicos são convertidos em uma série de símbolos, analisados e estruturados em unidades de subpalavras, que sejam capazes de representá-los com a mínima perda de informação possível.

A etapa inicial para um sistema de reconhecimento de fala consiste na aquisição do sinal de voz que servirá de entrada para o sistema. Esse processo pode ser realizado por microfones e amplificadores, os quais fornecem um sinal elétrico analógico. Depois que o sinal de áudio do microfone é amostrado, quantizado e codificado, o pré-processamento é realizado com o intuito de remover o ruído presente no sinal. Deste modo, deve-se realizar a depuração de sinal para aprimorar o processo de codificação e eliminar componentes indesejáveis, de maneira a realizar uma escalada do sinal para reduzir sua faixa dinâmica

e evitar possíveis erros de quantificação (PICONE, 1993).

O estágio de pré-processamento do sinal de voz pode ser dividido nas seguintes etapas: pré-ênfase, segmentação, janelamento e transformada de Fourier. Os aspectos mais importantes de cada um são detalhados a seguir:

- Pré-ênfase – Consiste na aplicação de um filtro passa-alta digital de primeira ordem com o intuito de compensar os efeitos dos impulsos glóticos e enfatizar as frequências dos formantes (MORENO, 1996). Esta etapa evita que dados sejam perdidos durante o processo de segmentação, uma vez que a maior parcela das informações se encontra contidas nas baixas frequências, além também de remover inteiramente o componente DC do sinal a fim de suavizá-lo espectralmente.
- Segmentação – Utilizada para definir precisamente os pontos iniciais e finais das palavras. É preciso diferenciar as partes do sinal que contêm informações de áudio daquelas que não contêm, a fim de reduzir o custo computacional exigido. Assim, o sinal de voz é dividido em quadros relativamente pequenos, de forma que eles assumam características para que possam ser considerados quase estacionários (SEPÚLVEDA, 2004). O tamanho do quadro é normalmente de 20 a 30 milissegundos, com um deslocamento típico de 10 milissegundos entre os quadros, o qual evita a perda de representação do segmento. Uma vez que o sinal é segmentado, os quadros são salvos como vetores de atributos para processamento posterior.
- Janelamento – A segmentação de sinais de voz introduz problemas de descontinuidade no início e no final de cada quadro, pois cada um deles começa e termina abruptamente. Sendo assim, precisa-se mitigar esse efeito multiplicando cada quadro por uma janela apropriada para suavizar as bordas do quadro até chegar a zero e, em seguida, enfatizar a parte central para destacar as propriedades características do segmento, conforme mostrado na Figura 1. Existem muitos tipos de janelas que podem ser utilizadas no reconhecimento de fala, no entanto, a mais utilizada é a janela de Hamming (MITRA, 2010).
- Transformada de Fourier – Levando em consideração a tarefa de reconhecimento de fala, quando o sinal é transformado em suas componentes de frequência, é então possível distinguir as vozes de locutores distintos e definir as palavras faladas (SIQUEIRA, 2011). Como o sinal de voz é não estacionário, o espectro de potência de cada quadro janelado pode ser extraído usando a Transformada Discreta de Fourier (OPPENHEIM e SCHAFER, 1999).
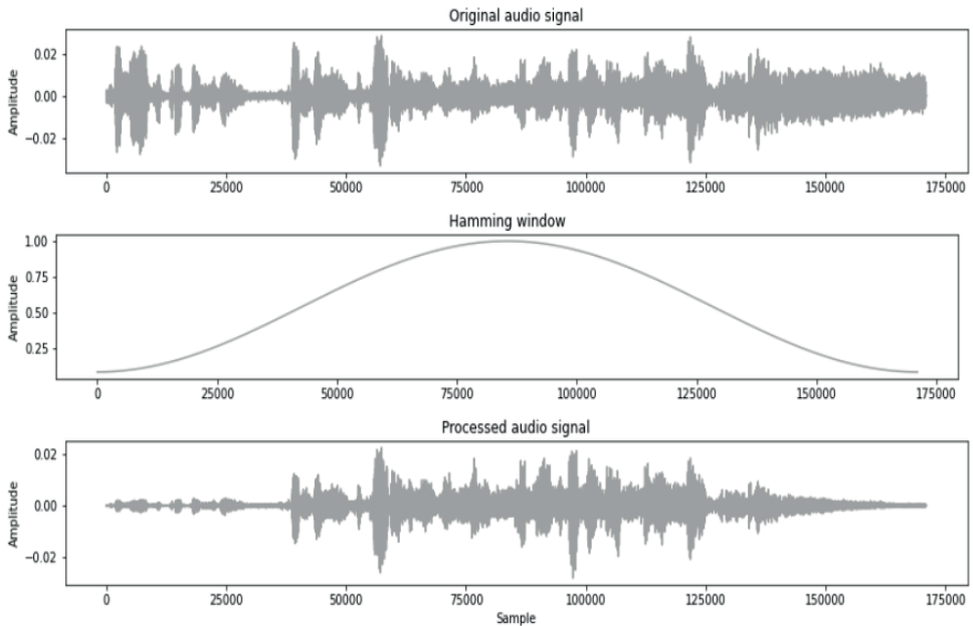
Figura 1. Aplicação da janela de Hamming ao segmento de áudio.

Após o pré-processamento do sinal de voz, realiza-se o processo de extração de características. Esta etapa objetiva representar o sinal de fala de uma maneira conveniente para o reconhecedor a partir de um conjunto de vetores de *n* componentes, capazes de representar o espectro de cada segmento de fala. Desta forma, é possível realizar a compressão do sinal por meio deste conjunto de vetores e suprimir informações irrelevantes para análise fonética futura dos dados pré-processados. Esse conjunto de vetores pode ser retratado de diversas maneiras com parâmetros que representam aspectos distintos do sinal. Ainda se faz necessário observar que quanto mais parâmetros um vetor tiver, os resultados da implementação se tornam menos confiáveis, além de demandar um maior custo computacional. Portanto, o número de parâmetros deve ser o menor possível, a fim de se evitar que a base de dados seja sobrecarregada.

Outra etapa essencial consiste na definição de um modelo de linguagem (gramática). Um modelo de linguagem utiliza o contexto das palavras e informações sobre a frequência com que as palavras são pronunciadas a fim de encontrar opções possíveis que apontem quais palavras têm mais probabilidade de vir antes ou depois de alguma outra.

As restrições impostas pelo modelo de linguagem melhoram significativamente o desempenho do sistema e reduzem o espaço de busca por frases corretas. De modo geral, o modelo da linguagem possui a função de calcular a probabilidade de uma palavra $P(W)$ em uma determinada sentença, dada todas as palavras que a precedem W_1, W_2,..., W_n. Desta forma, é possível expressar $P(W)$ da seguinte maneira:

$$P(W) = \prod_{i=1}^{n} P(W_i \mid W_1, W_2, \ldots, W_{i-1})$$

onde: $P(W_i \mid W_1, W_2, \ldots, W_{i-1})$. é a probabilidade de que W_i seja selecionada após a sequência de palavras ($W_1, W_2, \ldots, W_{i-1}$).

O bloco final do sistema de reconhecimento, definido como bloco de classificação, consiste em três subestruturas básicas destinadas a mesclar e comparar os vetores de características obtidos com padrões de referência. Essas referências representam os diversos objetos a serem identificados como sílabas, fonemas ou palavras, dependendo da arquitetura e do modelo de linguagem do sistema reconhecedor. Após a obtenção do vetor de características e do padrão de referência, é feita uma comparação entre a referência e a frase reconhecida. Essa forma de comparação está relacionada com o projeto do sistema de reconhecimento, exigindo-se a criação de modelos eficientes para identificar uma palavra entre muitas possíveis (RODRÍGUEZ *et al.*, 2004). Diferentes técnicas podem ser utilizadas para esse propósito, permitindo-se realizar a representação e construção de modelos de classificação.

Desta forma, podem-se representar as principais etapas de um sistema automático de reconhecimento de fala através do fluxograma apresentado na Figura 2.
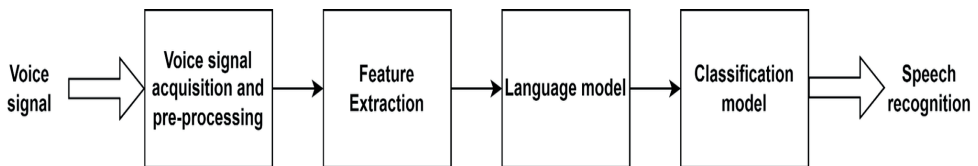
Figura 2. Estrutura de um sistema de reconhecimento automático de fala.

3 | O ESTADO DA ARTE EM SISTEMAS DE RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE FALA PARA SEP

Esta seção tem como objetivo apresentar os artigos proeminentes na literatura que utilizam técnicas de reconhecimento de fala aplicadas a problemas de sistemas elétricos de potência. Para a seleção dos artigos discutidos aqui, foram então realizadas buscas padronizadas nas mais diversas bases técnico-científicas. Este procedimento de busca segue um critério de filtro a partir das palavras chaves definidas, tendo-se em vista a grande quantidade de trabalhos correlatos encontrados. A principal palavra chave utilizada foi "*speech recognition*", sendo esta combinada com os termos tradicionais encontrados em estudos de aplicações no SEP, tais como "*power system*", "*power plant*" e "*power grid*". Além disso, aplicaram-se filtros de citações e idade da pesquisa, limitando-se os trabalhos a resultados entre 2016 e 2022.

No contexto de SEP, muitos estudos visam tratar de questões relacionadas com o despacho de energia. Em Jiangping *et al.* (2021), por exemplo, desenvolveu-se um modelo voltado para identificação do nome de entidades presentes em instruções relativas ao

despacho de energia. Neste trabalho, para compor a biblioteca de vocabulários, foram utilizados 600 termos relacionados com nomes de entidades citadas em instruções para despacho de energia, incluindo-se termos de especificação de contato de despacho, nomes de equipamentos do sistema de energia, ordens de operação típicas, entre outros.

Os autores utilizaram um modelo BERT-BIGRU-CRF em sua aplicação. O algoritmo BERT (*Bidirectional Encoder Representations from Transformers*) consiste em um modelo de linguagem baseado na extração de características. Ele utiliza uma grande quantidade de dados não rotulados para aprender o modelo de linguagem. No trabalho, o modelo BERT é utilizado para realizar o reconhecimento de nomes de entidades do sistema elétrico. Ainda referente a esta aplicação, os autores utilizam a rede neural BIGRU (*Bidirectional Gated Recurrent Unit*) para extrair padrões das instruções de despacho e construir um contexto de dependência com tais padrões. Por fim, o método CRF (*Conditional Random Fields*) foi utilizado para considerar a dependência entre vetores de palavras adjacentes, a fim de aumentar a acurácia do modelo de reconhecimento. Para o teste do método completo foram utilizadas 2000 instruções de despacho rotuladas. Os resultados indicaram que o modelo proposto com pré-treinamento do nome das entidades apresentou os melhores resultados do que os modelos tradicionais, atingindo-se em torno de 94% de acurácia (JIANGPING *et al*., 2021).

Instruções relacionadas com despacho de energia também foram analisadas em Zhang *et al*. (2021). Neste estudo, os autores desenvolveram um sistema inteligente para reconhecimento de fala. O diferencial deste sistema é sua adaptação para dados de voz relacionados com despacho de energia. Os autores criaram uma base de conhecimento sobre despacho de energia, construindo um dicionário acústico de conversas relacionadas a este contexto. Foram utilizadas técnicas de pré-processamento para reduzir ruídos e aumentar a robustez do modelo acústico. Para a construção do dicionário customizado, foram então selecionadas palavras comuns no dia a dia da operação, mas que não estão no vocabulário comum, e que por isso poderiam ser interpretadas erroneamente, tais como subestação, linha, ou nomes próprios, referentes aos nomes das subestações. Desta forma, o dicionário foi formado por dois conjuntos principais: nomes comuns para a operação, como nomes de subestações, por exemplo, e verbos comumente utilizados pelos operadores para dar e receber comandos.

O modelo acústico utilizado em Zhang *et al*. (2021) foi composto pela rede LSTM (*Long Short Term Memory*) e pela técnica CRF. Além disso, o método *N*-Gram foi utilizado para compor o modelo de linguagem. Como fonte de dados, os autores utilizaram ao todo um milhão de diálogos sobre o despacho de energia. Estes dados foram coletados em uma província na China. Dentre os principais resultados, verificou-se que o uso do dicionário personalizado ao invés do dicionário universal promove uma melhora na acurácia do reconhecimento das falas no contexto de despacho de energia.

Em Souza *et al*. (2021), o foco do trabalho é no sistema de classificação. Neste

artigo os autores buscaram desenvolver um sistema inteligente para classificar em seis categorias as chamadas de voz realizadas entre os centros de operação das subestações de uma empresa de energia elétrica (ENGIE) e a operadora nacional do sistema brasileiro (ONS). O principal foco do estudo é o de facilitar o processo de auditoria das ações internas dos operadores e aumentar a eficiência operacional. Para compor o sistema de classificação, foram então utilizadas ferramentas de *machine learning*. A primeira etapa utiliza a ferramenta *Amazon Web Service* para realizar a conversão das chamadas de *speech-to-text*. Os autores também propuseram análises para aumentar a precisão da ferramenta utilizando-se um vocabulário customizado voltado para palavras encontradas no dia a dia de uma planta operativa.

Em seguida, as chamadas de voz transcritas foram classificadas em seis categorias: mudança de estado, modulação de geração, mudança de tensão, nível do reservatório, chuva, entre outros. Para compor o conjunto de treinamento foram utilizados 650 áudios transcritos, que foram previamente rotulados por especialistas. Em relação à transcrição de texto, a taxa de reconhecimento das palavras ficou em torno de 30%. Em relação à classificação, foram avaliados diferentes modelos de classificação (*random forest*, *extra trees*, *gradient boosting*, LightGBM, XGBoost, *decision tree*), sendo que todos obtiveram uma acurácia de aproximadamente 93%. No contexto geral, os autores identificaram maiores erros de classificação para classes cujas palavras-chave tinham menor taxa de reconhecimento pelo sistema de transcrição de texto (SOUZA *et al*., 2021).

O foco na etapa de classificação da técnica de reconhecimento de fala também é verificado em Yu *et al*. (2020), em que o estudo propõe um modelo inteligente para classificar e rotular conjuntos de texto relacionados com a ocorrência de violações na operação de um sistema elétrico. Os autores utilizaram o método *Jieba Cutter* para dividir os textos das violações em palavras. As palavras chave sobre cada violação foram selecionadas como amostras para o treinamento do modelo de classificação. Para realizar a classificação foi utilizada a rede neural recorrente LSTM (*Long Short Term Memory Network*). O conjunto de treinamento foi composto por 1660 amostras, incluindo-se todos os tipos de violação que ocorrem na rede elétrica, sendo os dados obtidos de um sistema localizado ao sul da China. Neste estudo, os resultados mostram um nível de acurácia, em torno de 99%, para o modelo de classificação LSTM (YU *et al*., 2020).

Em Li *et al*. (2020), o foco do trabalho foi desenvolver um sistema inteligente de reconhecimento de fala em tempo real. O foco deste sistema é auxiliar nos procedimentos de notificação de segurança em campo, garantindo que todas as instruções de segurança sejam lidas e explicadas corretamente pelo responsável técnico. De acordo com os autores, os arquivos de voz obtidos foram pré-processados para a retirada do ruído presente no ambiente de subestação. Esse processamento do sinal foi realizado utilizando o método de subtração espectral, com determinação adaptativa de parâmetros. Após a remoção de ruídos do sinal de áudio, os autores utilizaram a rede LSTM para realizar o

reconhecimento de fala. Os métodos foram testados com três tipos de dados: arquivos de áudio gravados em ambientes silenciosos, arquivos de áudio com a adição artificial de ruídos, e arquivos de áudio obtidos em ambientes de subestação com o ruído característico destes locais. Os resultados obtidos pelos autores indicam que o nível de precisão no processo de reconhecimento de fala é incrementado pelo uso do pré-processamento dos arquivos de áudio para a remoção de ruídos. Além disso, de acordo com os autores, após o reconhecimento de fala realizado pela LSTM, também é realizada a comparação com as instruções de segurança originais, a fim de verificar se todas as etapas foram descritas. Todavia, os autores não indicam no trabalho como é realizada a comparação.

Aplicações em campo também são o foco em Li *et al.* (2019), em que os autores desenvolveram um sistema inteligente de operação móvel para ser utilizado durante o processo de manutenção de sistemas de energia. O funcionamento do sistema proposto é baseado na tecnologia de reconhecimento de fala. De acordo com os autores, o método segue as seguintes etapas: é realizada a captação do arquivo de áudio por meio de um microfone; é realizado um processo de pré-processamento de dados para remoção de ruídos do ambiente; em seguida, aplica-se um processo de extração de características do arquivo de áudio processado, a fim de filtrar as informações que mais representam o conteúdo do áudio; os dados extraídos são agrupados em categorias com o uso de métodos de clusterização; finalmente, o reconhecimento da fala é então realizado por meio do processo de reconhecimento de padrões. O processo de tratamento do áudio com ruído é realizado utilizando o Modelo oculto de Markov. O equipamento móvel desenvolvido foi testado em diferentes ambientes de manutenção e os testes foram realizados com diversos números de palavras e avaliados sistematicamente para cada ambiente. Os resultados indicam uma taxa de reconhecimento de fala de aproximadamente 98% para ambientes com alta presença de ruídos (LI *et al.*, 2019).

As técnicas de reconhecimento de fala também foram utilizadas para auxiliar no processo de treinamento dos operadores. Em Jorge *et al.* (2010) foi desenvolvida uma interface homem-máquina baseada no reconhecimento de fala automático. Tal interface foi desenvolvida para ser integrada a uma mesa de controle virtual de uma usina nuclear. Esta mesa virtual visa treinar operadores e avaliar a ergonomia do sistema ao simular o funcionamento de uma mesa de controle de uma usina nuclear. O uso de tecnologia de reconhecimento de voz integrado com a mesa virtual tem como finalidade trazer maior naturalidade para o treinamento, retirando a necessidade de se utilizar teclados e mouses devido às limitações físicas que tais equipamentos trazem. O reconhecimento de fala automático proposto no trabalho recebe comandos de voz compostos por palavras isoladas. Estas devem ser reconhecidas para que, em seguida, o comando correspondente possa ser executado (JORGE *et al.*, 2010).

O método de reconhecimento de fala proposto pelos autores é dividido em duas etapas. A primeira etapa consiste no pré-processamento dos sinais de fala utilizando

uma análise “cepstral”, que extrai parâmetros de sinais de voz para serem utilizados em processos de reconhecimento. Em seguida, os autores utilizaram Redes Neurais Artificiais (RNA) para identificar o comando correspondente aos padrões de voz obtidos da primeira análise. Duas RNA foram avaliadas, uma rede perceptron multicamada treinada com *backpropagation* e uma *General Regression Neural Network* (GRNN). Os autores também testaram a utilização das redes em paralelo para verificar se haveria aumento da robustez do método de classificação. Os resultados apresentaram uma alta taxa de reconhecimento dos comandos de voz, com níveis acima de 90% (JORGE *et al*., 2010).

Por fim, destacam-se alguns trabalhos que visam utilizar técnicas de reconhecimento de fala para substituir o operador em algumas atividades. Este tipo de aplicação propõe a redução da intensidade de trabalho operacional do agente e visa liberar os funcionários da execução de trabalho repetitivo. Em Zhang *et al*. (2019), por exemplo, os autores buscaram desenvolver um modelo do comportamento do operador de uma planta de energia, a fim de construir um operador virtual capaz de realizar as funções de operação. Para atingir tais objetivos, os autores aplicaram modelos de processamento de linguagem natural e modelos de operação do comportamento humanoide. Para aumentar a precisão do modelo de linguagem natural, os autores estabeleceram um vocabulário comum ao ambiente de operação de uma planta termoelétrica, sendo este o ambiente de aplicação do trabalho. Desta forma, foram definidas bibliotecas de palavras contendo termos relativos às atividades de operação, a nomes de equipamentos e de estados do sistema. Com base nos resultados, os autores indicaram que o robô de operação virtual corretamente reconhece a instrução de fala, é capaz de executar a operação especificada no simulador da usina, e retorna o feedback de informações para o atendente. Todavia, não foram especificados níveis de acurácia para o método proposto (ZHANG *et al*., 2019).

A substituição de ações do operador também é abordada em Xiang *et al*. (2021), em que os autores levantam a hipótese da construção de um sistema inteligente para realizar o despacho de energia, utilizando-se um módulo de agente inteligente, que representaria as ações do operador. O projeto propõe que o processo de reconhecimento de fala seja realizado pelo modelo WaveNet. Além disso, os autores também indicam a possibilidade de utilizar técnicas de aprendizado de máquinas para o reconhecimento de nomes de entidades do sistema elétrico, assim como técnicas para tornar o processo de reconhecimento de fala adaptável para diferentes interlocutores. Entretanto, o trabalho apenas apresenta a proposta do modelo, sem, no entanto, apresentar resultados de sua validação.

As Tabelas 1 e 2 reúnem as principais características dos trabalhos avaliados. A Tabela 1 foca na estrutura do sistema de reconhecimento de fala proposto, tendo como base o esquema apresentado na Figura 2. Enquanto a Tabela 2 considera outros aspectos relevantes da pesquisa, tais como a presença ou não de análises comparativas dos resultados e a utilização de técnicas de otimização para os métodos utilizados. As análises sobre os artigos apresentados e as tabelas serão desenvolvidas na próxima seção.

Ref.	Type of ASR	Automatic Speech Recognition System			
		Voice signal acquisition and pre-processing	Feature Extraction	Language model	Classification model
Jiangping *et al.* (2021)	Connected speech recognition.	Continuous Bag of Words Model was used to segment the instructions.	BiGRU model.	BERT model.	Conditional Random Fields (CRF).
Zhang *et al.* (2021)	Connected speech recognition.	–	Kaldi method to extract multidimensional Mel-Frequency Ceptral Coefficients (MFCC).	N-Gram language model.	Long Short-Term Memory (LSTM) network and Conditional Random Fields (CRF).
Yu *et al.* (2020)	Isolated words recognition (Text classification).	Jieba Cutter to cut each sentence into words. Then, keywords are selected as learning samples, and the word2vector model is used to transform them into eigenvectors.	Recurrent Neural Network (RNN) extracts features from the data.	–	Recurrent Neural Network (RNN).
Li *et al.* (2020)	Not specified.	Improved Parameter Adaptive Spectral Subtraction (IPASS).	–	–	Long Short-Term Memory (LSTM).
Li *et al.* (2019)	Isolated words recognition.	Hidden Markov Model (HMM).	Not specified.	Not specified.	Not specified.
Zhang *et al.* (2019)	Connected speech recognition.	Forward maximum matching algorithm for sentence segmentation.	–	N-Gram language model.	–
Souza *et al.* (2021)	Isolated words recognition (Text classification).	–	Not specified.	–	Decision tree, random forest, extra trees, gradient boosting, XGBoost and LightGBM.
Jorge *et al.* (2010)	Isolated words recognition.	Blank space elimination using short-time energy method.	Cepstral analysis.	–	Artificial neural networks (feedforward) trained with backpropagation algorithm and General Regression Neural Network (GRNN).
Xiang *et al.* (2021)	Not specified.	Applied frame cutting.	MFCC features were extracted using natural language processing technology.	Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT).	–

Tabela 1. Estrutura dos Sistemas de Reconhecimento de Fala Presentes na Literatura Avaliada.

Ref.	Main method	Full model accuracy	Custom vocabulary	Input data	Comparative analysis	Optimization method
Jiangping *et al*. (2021)	BERT-BIGRU-CRF.	≈94%	Power dispatch instructions.	3 generic datasets were analyzed: clue2020, MsrA and people's daily datasets. In addition, 2000 power dispatch instructions were used.	Different datasets and different models were comparatively evaluated.	–
Zhang *et al*. (2021)	LSTM-CRF.	Word error and sentence error rates, respectively, 1,38% e 9,28%.	Built a customized dictionary using energy dispatch commands.	1 million samples related to energy dispatch speech were collected in an energy dispatch center in China.	Different feature extraction methods were evaluated. In addition, the proposed model is compared with other traditional techniques and the use or not of a customized dictionary is also evaluated.	Cepstral Mean and Variance Normalization (CMVN) method is used after feature extraction to reduce channel and noise effects and improve the robustness of the acoustic model.
Yu *et al*. (2020)	LSTM.	~99%	–	1660 samples of text collected from South China Grid.	The proposed method was compared with Naive Bayes Classifier and Logistic Regression.	-
Li *et al*. (2020)	IPASS-LSTM.	19.5 (Word Error Rrate - WER).	–	Both simulated and on-site data were analyzed and used as input for the methods. Different levels of ambient noise were also tested. The number of samples is not specified.	The proposed IPASS method for noise reduction is compared with traditional spectral subtraction and multiband spectral subtraction.	Proposes an optimal parameter selection for IPASS based on signal-to-noise ratio to allow noise robustness.
Li *et al*. (2019)	Not specified.	98.09%	–	Is indicated that three datasets of 10 words, 30 words and 50 words were tested in different noisy environments.	Different types and levels of environmental noises were tested.	–
Zhang *et al*. (2019)	Microsoft SAPI voice development platform.	–	Customized vocabulary based on thermal power plants terms- operation terms, equipment names and state terms.	–	–	–

Souza *et al.* (2021)	Amazon transcribe (AWS) for speech-to-text.	The highest classification accuracy for one label was 99,5%, while the lowest was 89% for random forest method.	Customized vocabulary with proper nouns, technical terms and commonly used acronyms to improve speech-to-text performance.	For the classification phase, 650 labeled transcribed audios were used for training.	300 combinations were analyzed - different classification models and different combinations of input features.	–
Jorge *et al.* (2010)	ANN.	~97%	–	20 samples for each command (class) were used as data. The datasets were created using both random and sequential speech.	There was a comparative analysis between the ANN used and between an approach using both ANNs in parallel.	–
Xiang *et al.* (2021)	WaveNet is used for the speech-to-text process.	–	Power dispatching vocabulary.	Power grid dispatching rules and power grid historical data.	–	To create an ASR system that is adaptive, the paper uses memory sensing network to extract dispatcher's voice auxiliary features.

Tabela 2. Características dos Estudos Avaliados.

4 I ANÁLISE DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO ESTADO DA ARTE

Inicialmente, pode-se então avaliar a motivação dos estudos analisados na seção anterior. Verifica-se que a maioria das abordagens presentes na literatura para aplicações de ASR em SEP tem como finalidade agregar maior segurança aos processos de operação, a fim de auxiliar no processo de verificação de instruções de despacho (JIANGPING *et al.*, 2021), garantindo notificações de segurança (LI *et al.*, 2020) e auxiliando no treinamento de pessoal (JORGE *et al.*, 2010). Alguns estudos como em Zhang *et al.* (2019) e Xiang *et al.* (2021) também indicam o aumento da eficiência operacional ao substituir parcialmente por um sistema inteligente as ações realizadas pelo operador. Também se observou a necessidade de facilitar os processos de auditoria (SOUZA *et al.*, 2021), que atualmente são executados por meio de processos custosos, demandando aos operadores ouvirem horas de arquivos de áudio. Todavia, ainda existem diversas abordagens que podem ser exploradas neste contexto, como por exemplo, a avaliação de sentimentos para determinar o nível de segurança das atividades de cada operador. Este tipo de análise é muito presente na literatura, mas ainda não foi abordado no contexto de SEP. Um artigo de revisão sobre o tópico é encontrado em Koolagudi e Rao (2012).

Com base na Tabela 1 observa-se que a maioria dos autores utiliza como

técnicas de pré-processamento os métodos de segmentação para dividir sentenças em palavras, facilitando-se assim o processo de seleção de palavras-chave que representem aquela sentença e também o processo de classificação posteriormente realizado para o reconhecimento da palavra. Não obstante, não foi verificada a predileção por nenhum método específico para realizar o processo de segmentação. O processo de extração de características também foi avaliado. Verificou-se que alguns artigos como Souza *et al*. (2021), Yu *et al*. (2020) e Li *el al*. (2019) indicam a extração de características dos dados sem no entanto explicitar o método utilizado. Dentre os trabalhos que apresentaram os métodos utilizados, foi possível observar uma predileção pelo uso dos *Mel-Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC), que consiste em um tipo de análise muito comum na literatura de sistemas de reconhecimento de fala. Os MFCC são utilizados para evidenciar as componentes de baixa frequência da fala frente às de alta frequência, pois as primeiras possuem maior nível de informação (KOOLAGUDI *et al*., 2012).

Em relação aos métodos de classificação utilizados, foi possível verificar uma predileção dos autores pelo uso de redes neurais artificiais, principalmente a rede LSTM. Esta rede consiste em um tipo de rede neural recorrente e sua popularidade para este tipo de aplicação pode ser justificado pela sua capacidade de atuar em frases longas devido a sua habilidade de memorização. Além disso, de acordo com os autores, esta rede é capaz de extrair informações de sentenças com comprimento variado, o que é uma vantagem frente a outros modelos (YU *et al*., 2020).

Na Tabela 2 observa-se que diversos trabalhos fazem uso de vocabulário customizado com termos do contexto de sistemas elétricos de potência. Verifica-se ainda que tais trabalhos são os que utilizam modelos de reconhecimento de fala ou de transcrição de texto que já são sedimentados na literatura, como em Jiangping *et al*. (2021) e Xiang *et al*. (2021), em que se usa o modelo BERT; em Zhang *et al*. (2021) e Zhang *et al*. (2019), em que o modelo de linguagem *N*-Gram é aplicado; e em Souza *et al*. (2021), em que se utiliza o AWS. Desta forma, infere-se que o uso do vocabulário customizado atua no processo de *transfer learning* e *fine tuning* dos métodos. A vantagem de utilizar um modelo já consolidado na literatura é poder utilizar o aprendizado deste modelo que já foi treinado, usualmente com um grande número de dados, para atuar em um problema particular.

O processo de transferência de aprendizado se baseia na hipótese de que, se um modelo foi treinado com um conjunto de dados grande o suficiente para certa aplicação, ele pode então ser considerado como um modelo generalista para aplicações similares (TENSORFLOW, 2023). No caso, modelos que já foram treinados com uma grande quantidade de amostras de áudio podem ser considerados modelos gerais para reconhecimento de fala, mesmo que não sejam focados em termos de sistemas elétricos de potência. O processo de ajuste fino funciona para especializar tais modelos generalistas para uma determinada aplicação. Desta forma, podem-se utilizar os vocabulários customizados para termos específicos de SEP, para ensinar ao modelo, que já possui um

conhecimento anterior, sobre esta nova aplicação (TENSORFLOW, 2023). Os processos de transferência de aprendizado e ajuste fino são muito comuns em aplicações de *deep learning*, por facilitarem o processo de treinamento dos modelos e contornarem problemas como a falta de dados de treinamento, por exemplo.

Com base nos resultados dos métodos apresentados na Tabela 2, verifica-se um nível elevado de acurácia, atingindo taxas acima de 94% para a maioria dos trabalhos avaliados. Em relação aos dados de entrada, verificou-se que alguns artigos como Li *et al*. (2020), Li *et al*. (2019) e Xiang *et al*. (2021) não indicaram o número de amostras utilizados, mas informaram apenas o tipo de amostras que foram avaliadas. De fato, Li *et al*. (2020) é o único artigo que indica o uso de amostras simuladas, que foi justificado pelo teste de diferentes níveis de ruído. Em relação aos outros artigos, verificou-se uma predominância do uso de dados coletados de redes elétricas chinesas, como em Jiangping *et al*. (2021), Zhang *et al*. (2021) e Yu *et al*. (2020). Em Jiangping *et al*. (2021) também é verificado o uso de datasets genéricos disponíveis online. Um aspecto interessante a ser observado é a pequena quantidade de amostras utilizadas em Souza *et al*. (2021) para o processo de classificação de texto, assim como em Jorge *et al*. (2010) para o reconhecimento de palavras isoladas. Mesmo com um número reduzido de amostras, ambos os estudos apresentaram bons níveis de acurácia, o que indica a qualidade do dataset selecionado.

Um aspecto em comum entre os artigos é que a maioria apresenta algum tipo de análise comparativa. Alguns, como em JIANGPING *et al*. (2021), Zhang *et al*. (2021), Yu *et al*. (2020) e Souza *et al*. (2021) apresentam comparação entre diferentes métodos de classificação, enquanto outros apresentam comparações entre diferentes tipos de dados (LI *et al*., 2019), diferentes métodos de pré-processamento (LI *et al*., 2020) ou diferentes abordagens de um mesmo modelo (JORGE *et al*., 2010). Ressalta-se a importância de análises comparativas para validar o método proposto no artigo frente a outros métodos existentes, além de auxiliar na expansão do tema de estudo, por avaliar diferentes possibilidades de aplicação.

Em relação aos métodos de otimização, poucos artigos utilizam tais técnicas. Destacam-se aqueles apresentados em Zhang *et al*. (2021) e Li *et al*. (2020), os quais utilizam diferentes métodos de otimização para tratar da presença de ruídos nos arquivos de áudio coletados nos ambientes de subestação. Esta abordagem de tratamento de ruídos é importante, pois os ambientes relacionados com aplicações de SEP geralmente apresentam elevados níveis de ruído característicos, tais como a presença de ruídos de máquinas, de linhas de transmissão em operação e também a presença de outras vozes ao fundo, devido à ocorrência de chamadas telefônicas simultâneas no centro de operação.

Por fim, um aspecto importante a ser considerado é o nível de desenvolvimento dos trabalhos encontrados na literatura para aplicações de ASR em SEP. Observa-se que alguns trabalhos simplesmente tratam do processo de classificação de texto, como em Souza *et al*. (2021) e Yu *et al*. (2020), não realizando a construção completa de um sistema

de reconhecimento de fala. Além disso, um dos trabalhos, apresentado em Xiang *et al*. (2021), apenas levanta hipóteses para a construção de um ASR para este tipo de aplicação, não trazendo simulações ou resultados que validam tais hipóteses. Por fim, verifica-se que trabalhos que realizam a construção de um ASR completo, como em Jorge *et al*. (2010), usualmente o fazem para reconhecimento de palavras isoladas e não de frases, ou então, fornecem pouca informação sobre as características do modelo, como em Li *et al*. (2019) e Zhang *et al*. (2019). Desta forma, verifica-se uma lacuna dentre os estudos da área para trabalhos que descrevam e forneçam detalhes sobre a construção de sistemas de reconhecimento de fala completos aplicados à área de SEP.

5 I CONCLUSÕES

Este capítulo teve como objetivo apresentar uma revisão sobre trabalhos que utilizam técnicas de reconhecimento de fala no contexto de sistemas elétricos de potência. A análise da literatura e a seleção dos trabalhos apresentados foram feitas de forma sistemática seguindo uma metodologia projetada para selecionar os artigos mais recentes e proeminentes do tema. A principal conclusão sobre a revisão de literatura reside na baixa incidência de artigos que tratam sobre ASR no contexto de SEP, de forma que ainda é um tema com muitos tópicos a serem explorados. Tais tópicos foram ressaltados ao longo do texto para auxiliar trabalhos futuros.

A análise dos artigos selecionados foi realizada de forma comparativa, utilizando-se duas tabelas principais contendo as características primordiais de cada trabalho. Diversos aspectos foram avaliados, tais como: métodos utilizados, níveis de acurácia, utilização de métodos de otimização, natureza do conjunto de dados, entre outros. Dentre as análises, o ponto de principal atenção foi a ausência de estudos que apresentem de forma detalhada a construção de um sistema completo de ASR para a identificação de frases completas. Além disso, observou-se a carência de análises sobre problemas tradicionais no contexto de reconhecimento de fala, tais como a presença de diferentes interlocutores, com tons de ritmos de fala distintos. Desta forma, este trabalho visa ressaltar a importância do tema, pois existem inúmeros problemas e processos em SEP que podem ser resolvidos e melhorados com o uso da tecnologia de ASR. Com efeito, espera-se também estimular o desenvolvimento de novos trabalhos, pois há ainda uma grande área a ser explorada neste tema.

REFERÊNCIAS

ALNASSER, A.; AL-GHOWINEM, S. Vocally specified text recognition in natural scenes for the blind and visually impaired. *In*: Arai, K., Kapoor, S., Bhatia, R. (eds) Intelligent Computing. SAI 2018. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 858, pp 231–248, 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 1.005** (15 de fevereiro de 2022), 2022.

BROWN, M. K.; MCGEE, M. A.; RABINER, L. R.; WILPON, J. G. Training set design for connected speech recognition. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 39, n. 6, p. 1268-1281, 1991.

COSTA, W. C. A. **Reconhecimento de fala utilizando modelos de markov escondidos (HMM's) de densidades contínuas**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 103, 1994.

CUERVO, L. **Introdução à fisiologia da voz – práticas vocais para a educação musical**. Porto Alegre: Departamento de Música (UFRGS), 2010.

GU, H.; TSENG, C.; LEE, L. Isolated-utterance speech recognition using hidden Markov models with bounded state durations. **IEEE Transactions on signal processing**, v. 39, n. 8, p. 1743-1752, 1991.

HUANG, X. D. Phoneme classification using semicontinuous hidden Markov models. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 40, n. 5, p. 1062-1067, 1992.

JIANGPING, J. *et al*. Analysis of power grid dispatching instructions based on BERT-BIGRU mode. *In*: IEEE CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS, OPTICS AND COMPUTER SCIENCE, 2021, Shenyang, China. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2021.

JORGE, C. A. F. *et al*. Human-system interface based on speech recognition: application to a virtual nuclear power plant control desk. **Progress in Nuclear Energy**, v. 52, n. 4, p. 379-386, 2010.

KOOLAGUDI, S. G.; RAO, K. S. Emotion recognition from speech: a review. **International Journal of Speech Technology**, v. 15, p. 99-117, 2012.

KOOLAGUDI, S. G.; RASTOGI, D.; RAO, K. S. Identification of language using mel-frequency cepstral coefficients (MFCC). **Procedia Engineering**, v. 38, p. 3391-3398, 2012.

LELARDEUX, C. P. *et al*. Communication system and team situation awareness in a multiplayer real-time learning environment: application to a virtual operating room. **The Visual Computer**, v. 33, p. 489-515, 2017.

LI, H.; LI, Z.; RAO, Z. Mobile operation platform for power system maintenance based on intelligent speech recognition. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING, AUTOMATION AND SYSTEMS, 2019, Chongqing, China. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2019.

LI, C. *et al*. A novel speech recognition algorithm for substation safety notification based on IPASS-LSTM. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRIDS AND ENERGY SYSTEMS, 2020, Perth, Australia. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2020.

MALIK, M.; MALIK, M. K.; MEHMOOD, K.; MAKHDOOM, I. Automatic speech recognition: a survey. **Multimedia Tools and Applications**, v. 80, p. 9411-9457, 2021.

MARTIN, T. B. Practical applications of voice input to machines. **Proceedings of the IEEE**, v. 64, n. 4, p. 487-501, 1976.

MITRA, S. K. **Digital signal processing: a computer-based approach**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

MORENO, P. J. **Speech recognition in noisy environments**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computação) – Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, Pennsylvania, p. 130, 1996.

NEDJAH, N.; SANTOS, I.; MOURELLE, L. M. Sentiment analysis using convolutional neural network via word embeddings. **Evolutionary Intelligence**, v. 15, p. 2295–2319; 2022.

OPPENHEIM, A. V; SCHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing**, 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999.

OSHIKAWA, R.; QIAN, J.; WANG, W. Y. A survey on natural language processing for fake news detection. **ArXiv**, v. abs/1811.00770, 2018.

PÉREZ, F.J. *et al*. Multimedia analysis platform for crime prevention and investigation. **Multimedia Tools and Applications**, v. 80, p. 23681-23700, 2021.

PICONE, J. Signal modeling techniques in speech recognition. **Proceedings of the IEEE**, v. 81, n. 9, p. 1215-1247, 1993.

RABINER, L. R. Special issue on man-machine communication by voice. **Proceedings of the IEEE**, v. 64, n. 4, p. 403-404, 1976.

RODRÍGUEZ, J. L. O.; GUERRA, S. S.; FERNÁNDEZ, R. B. **Reconocimiento de voz usando segmentación de energía usando modelos ocultos de Markov de densidad continua**. Cidade do Méximo: CIC-IPN, 2004.

SAMBUR, M. R.; RABINER, L. R. A speaker-independent digit-recognition system". **The Bell System Technical Journal**, v. 54, n. 1, p. 81-102, 1975.

SANTOS, M. O. **Análise acústica de desvios vocais infantis utilizando a transformada wavelet**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. João Pessoa, p. 80, 2015.

SEPÚLVEDA, F. A. **Extracción de parámetros de señales de voz usando técnicas de análisis en tiempo-frecuencia**. Tese (Mestrado em Automação Industrial) – Facultad de Ingenier´ıa y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colômbia, p. 115, 2004.

SIQUEIRA, J. K. **Reconhecimento de voz contínua com atributos MFCC, SSCH e PNCC, wavelet denoising e redes neurais**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 85, 2011.

SOUZA, F. D. *et al*. Multi-Label classification of voice calls from power plant operation centers. *In*: IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE – LATIN AMERICA), 2021, Lima, Peru. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2021.

TENSORFLOW. Transferência de aprendizado e ajuste fino. **TensorFlow**, 2023. Disponível em: <https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer_learning>. Acesso em: 09 de jun. de 2023.

UNNIKRISHNAN, K. P.; HOPFIELD, J. J.; TANK, D. W. Connected-digit speaker-dependent speech recognition usin neural network with time-delayed connections. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 39, n. 3, p. 698-713, 1991.

VADWALA, A. Y.; SUTHAR, K. A.; KARMAKAR, Y. A.; PANDYA, N. Survey paper on different speech recognition algorithm: challenges and techniques. **International Journal of Computer Applications***, v. 175*, p. 31-36. 2017.

VENKATASUBRAMANIAN, S., MOHANKUMAR, R. A deep convolutional neural network-based speech-to-text conversion for multilingual languages. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 1420, p. 617–633, 2022.

XIANG, Z. *et al*. Design of intelligent dispatching system based on human voice adaptive speech recognition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2021, Haikou, China. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2021.

YU, Y. *et al*. Intelligent classification and automatic annotation of violations based on neural network language model. *In*: *INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS*, 2020, Glasgow, UK. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2020.

ZHANG, H; XIAO, L.; YAN P.; XIAO, Q. Research on speech recognition of power grid dispatching based on big data and deep learning. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2021, Haikou, China. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2021.

ZHANG, Q.; MA, J.; WANG, J. Application research of virtual operation robot in smart power plant. *In*: CHINESE AUTOMATION CONGRESS, 2019, Hangzhou, China. **Anais** […] Piscataway: IEEE, 2019.

ZHANG, Y. Design of automatic evaluation of machine English translation based on BP neural network. **Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies**, v. 123, p. 359-367, 2022.

CAPÍTULO 3

LUMINÁRIA DE BANCADA EM LED COM DIMERIZAÇÃO EM MALHA FECHADA

Data de aceite: 03/07/2023

Nadson Vieira dos Santos
Centro Universitário São Lucas Educacional
Porto Velho – Rondônia

Alam Ribeiro da Silva
Centro Universitário São Lucas Educacional
Porto Velho – Rondônia
https://lattes.cnpq.br/8913390082288931

Geoziel Nascimento da Silva Junior
Centro Universitário São Lucas Educacional
Porto Velho – Rondônia

Orleans Mendonça Cardoso
Centro Universitário São Lucas Educacional
Porto Velho – Rondônia
https://lattes.cnpq.br/9198289414820276

RESUMO: Este projeto tem por finalidade desenvolver uma luminária de bancada de utilização acadêmica. O circuito é alimentado por uma fonte de tensão simétrica. A iluminância dos LEDs é constantemente ajustada pelo controlador proporcional-integral projetado com base na leitura do sensor, um Resistor dependente de luz (LDR) [7], realizando, assim, o ajuste automático na iluminação para que ela se mantenha constante diante de qualquer perturbação luminosa que seja captada pelo sensor, sendo possível obter uma iluminância dentro dos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

PALAVRAS-CHAVE: Luminária, amplificador operacional, LDR, iluminância, NBR/ISO.

LED COUNTERTOP LIGHT WITH CLOSED LOOP DIMERIZATION

ABSTRACT: The purpose of this project is to develop a benchtop luminaire for academic use. The circuit is powered by a symmetrical voltage source. The illuminance of the LEDs is constantly adjusted by the proportional-integral controller designed based on the reading of the sensor, a Light Dependent Resistor (LDR) [7], thus performing the automatic adjustment in illuminance so that it remains constant in the face of any light disturbance that is captured by the sensor, being possible to obtain an illuminance within the parameters established by ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

KEYWORDS: Lighting, operational

amplifier, LDR, illuminance, NBR/ISO

1 I INTRODUÇÃO

A iluminação de um ambiente acadêmico é de grande importância para o desenvolvimento estudantil, quando a falta de iluminância e/ou o excesso são condições as quais os estudantes passam a conviver são, sem dúvidas, um fator que gera desconforto, cansaço e, principalmente, atrapalha o crescimento acadêmico do aluno. Devido a essas condições ditas, a iluminação de cada ambiente é pré-definida em alguns parâmetros, parâmetros estes estudados e definidos pela ABNT NBR/ISO 8995 - Iluminação em Ambientes de Trabalho. Consequentemente, quando a iluminação não correspondente aos parâmetros pré-definidos, a iluminação prejudica o desenvolvimento de competências, sejam elas pessoais e/ou profissionais dos alunos [2]. Portanto torna-se extremamente importante uma correta iluminação desses locais de estudo e dos ambientes de práticas (laboratórios), dessa maneira, originando o projeto a qual esse artigo é direcionado.

2 I LEVANTAMENTO DE DEMANDAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA LUMINÁRIA DE BANCADA DE LED

Na figura 6, podemos ver que para atingir o objetivo do projeto pensou-se em projetar um circuito de controle para que a dimerização pudesse ser feita automaticamente, e um circuito de modulador para gerar o PWM que será enviado para o driver. O circuito é constituído por circuitos integrados, resistores, capacitores e transistores. Nesse projeto utilizamos o LM324 que funciona com uma tensão de até 32V [5] e possui 4 amplificadores operacionais embutidos em sua estrutura.

3 I REVISÃO DE LITERATURA

Com as demandas devidamente definidas, foi dado início a revisão de literatura relativa à teoria de iluminância, geração de sinal PWM, comportamento do LDR, teoria de controle, funcionamento e características dos amplificadores operacionais, componentes eletrônicos que foram selecionados para a implementação do projeto e possíveis formas de solução de problemas.

4 I PARÂMETROS DE ILUMINÂNCIA

Visto que cada tipo de ambiente exige um determinado nível de iluminância, foi dado início à pesquisa relativa as normas que regulamentam esta característica. Inicialmente foi estudada a NBR 5413 - Iluminância de interiores, onde estabelece os valores de iluminâncias médias mínimas em serviço para iluminação artificial em interiores, onde se

realizem atividades de comércio, indústria, ensino, esporte e outras [3]. Na página 4 da presente norma, item 5.3.13, é estabelecido o nível de iluminância para ambientes escolares. Tendo ciência do nosso objetivo, foi utilizado como parâmetro níveis de iluminação para laboratórios, conforme figura 1.

5.3.13 Escolas

- salas de aulas .... 200 - 300 - 500
- quadros negros .... 300 - 500 - 750
- salas de trabalhos manuais ...... 200 - 300 - 500
- laboratórios
  . geral .... 150 - 200 - 300
  . local .... 300 - 500 - 750

Figura 1 - Tabela de iluminância NBR 5413. Valores em Lux

Ao dar andamento nos trabalhos, durante a revisão final, foi identificado que a NBR 5413 havia sido revogada, sendo a norma vigente a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 - ILUMINAÇÃO EM AMBIENTES DE TRABALHO [2], que na página 21 da presente norma estabelece outros parâmetros de iluminação, conforme figura 2.

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\overline{E}_m$ lux	UGR_L	R_a	Observações
Sala de leitura	500	19	80	Recomenda-se que a iluminação seja controlável.
Quadro negro	500	19	80	Prevenir reflexões especulares.
Mesa de demonstração	500	19	80	Em salas de leitura 750 lux.
Salas de arte e artesanato	500	19	80	
Salas de arte em escolas de arte	750	19	90	T_{cp} > 5 000 K.
Salas de desenho técnico	750	16	80	
Salas de aplicação e laboratórios	500	19	80	

Figura 2 - Parâmetros para iluminância de laboratórios ABNT NBR ISO/CIE 8995-1.

Mesmo o projeto estar calculado e prototipado para atender a NBR 5413, os parâmetros podem ser reajustados para atender os valores da nova tabela, bem como atender outros ambientes. Devido ao conceito e circuito não se alterar, optou-se em atender os valores fornecidos pela antiga NBR visto que o objetivo do trabalho foi alcançado.

5 I AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Ao definirmos que seria usado o CI LM324, que possui 4 ampops em sua estrutura, foi consultado o seu datasheet para reunir informações sobre os níveis de tensões,

corrente, temperaturas de trabalho e outros dados relevantes ao desenvolvimento do projeto. Também foi consultado o funcionamento dos amplificadores operacionais nas configurações amplificador não-inversor, amplificador inversor, subtrator, comparador, buffer de tensão, e outros modos de operação utilizados.

6 I IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Após realizada a revisão da literatura, foi iniciada a fase de montagem, simulações e testes virtuais dos circuitos projetados para verificação do funcionamento. Assim como relacionado na primeira fase, a montagem seguiu a seguinte sequência: circuito modulador, circuito de controle, interligação dos circuitos.

6.1 Circuito modulador

Na etapa de revisão de literatura, foi visto que uma das formas mais simples de se gerar um sinal PWM é através da comparação de uma tensão de referência com um sinal triangular simétrico [4]. Para obter o sinal PWM para alimentação do LED, foi desenvolvido um circuito de modulação de sinal. Após estudos, análises e testes em simuladores virtuais, obteve-se o circuito apresentado na figura 3.
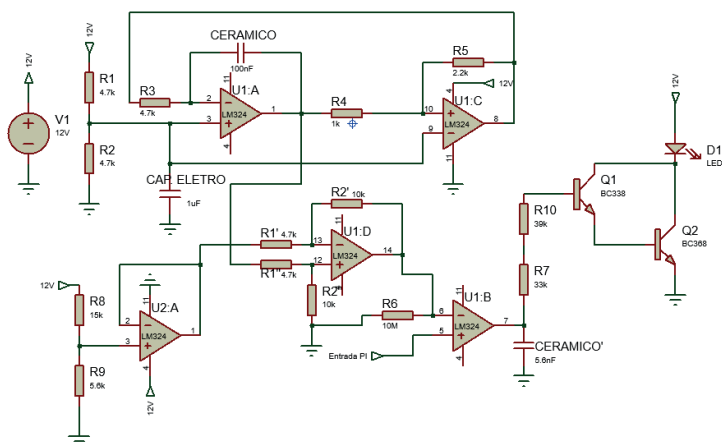
Figura 3 - Circuito do modulador simulado em Software.

O primeiro estágio do circuito e formado por dois ampops que realizam, juntos, a função de oscilador, um ampop no modo de realimentação positiva e outro como um filtro ativo passa-baixa, gerando uma onda triangular. Foi identificado que a onda gerada pelo oscilador estava com uma amplitude de 6V, de 3.4V a 9.4V, sendo o ideal uma onda triangular com a maior amplitude possível, 12V.

Para alcançar o objetivo, foi inserido um amplificador operacional no modo subtrator amplificador, para que a onda triangular original pudesse ter um curso de 0V a 12V. O ampop no modo subtrator amplificador irá subtrair uma tensão de referência dos valores

obtidos e amplificar o sinal para que se obtenha a amplitude desejada. Foi utilizado um ampop no modo buffer de tensão para que o divisor de tensão feito para obter a tensão de referência não interfira na configuração do subtrator.

Com a onda triangular com amplitude de 12V gerada, ela será enviada ao último ampop do circuito que está no modo comparador. A onda triangular obtida será comparada com um sinal que virá do circuito de controle gerando o sinal PWM - (Pulse Witdh Modulation) realizando o controle de potência fornecida ao LED.

Através de testes, foi identificado que a saída do circuito modulador fornece uma corrente máxima de 60mA, entretanto o LED consome uma corrente máxima de 500mA. Para solucionar esse problema foi projetado um driver para que o LED funcione corretamente.

O driver é composto por dois transistores, BC338 e BC368, dispostos em cascata na configuração Darlington, configuração que se faz necessária para o driver suportar até duas vezes a corrente nominal em regime permanente, e tem a função de amplificar a corrente fornecida pelo circuito modulador, para que o led funcione corretamente. A configuração foi escolhida por proporcionar um grande ganho de corrente [1]. O funcionamento do circuito modulador é demonstrado pelo fluxograma da figura 4.
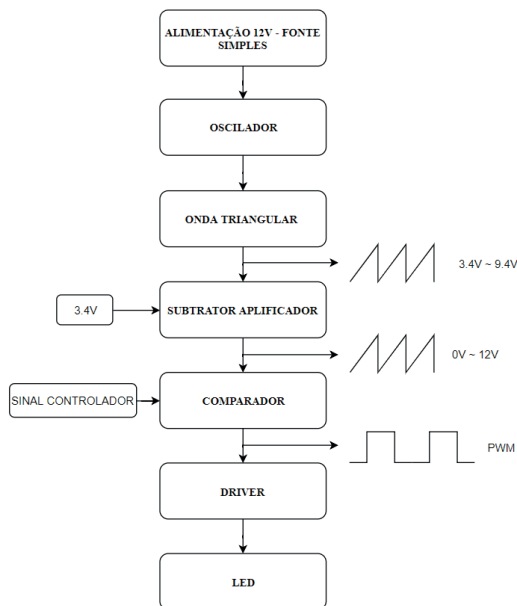
Figura 4 - Fluxograma funcionamento do circuito modulador.

6.2 Circuito controlador

Na etapa de revisão de literatura, constatou-se que uma forma de se realizar o controle da iluminância poderia ser feito por um controlador proporcional-integral e ele atenderia os requisitos do sistema proposto, que é manter um nível de iluminação constante.

Sabendo disso, foi desenvolvido o circuito de controle escolhido, e após estudos, análises e testes em simuladores virtuais, obteve-se o circuito apresentado na figura 5, que, diferente do circuito modulador, a alimentação desse circuito é feito através de uma fonte simétrica de +/-12V.
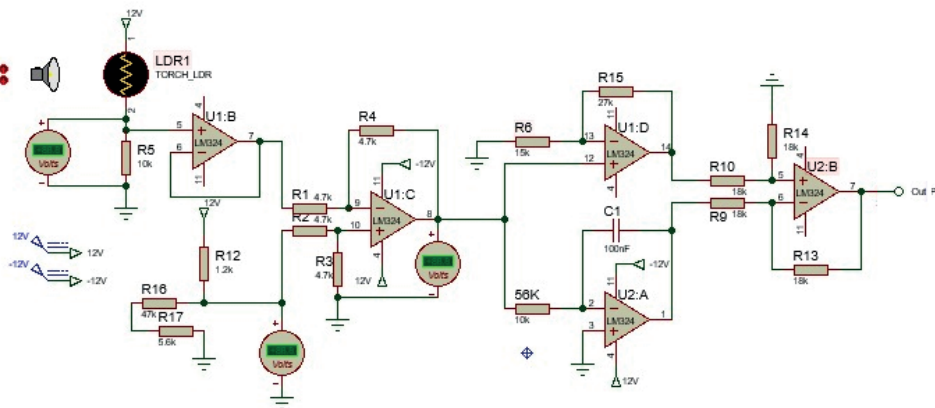
Figura 5 - Circuito Controlador Proporcional-Integral.

Inicialmente, temos um ampop no modo subtrator unitário que irá calcular a diferença entre a tensão de referência(setpoint) e a tensão fornecida pelo sensor (offset). Neste caso, a intensidade luminosa está sendo representada por níveis de tensão. Através do método de tentativa e erro, foi obtido um setpoint de aproximadamente 9.78V, que representa a intensidade luminosa desejada, aproximadamente 700 luxes.

O ampop no modo buffer de tensão isola o divisor de tensão formado por um resistor fixo e o sensor utilizado, mantendo o sinal de entrada na saída, para que não haja interferência entre as resistências equivalentes de cada etapa. O buffer de tensão é capaz de realizar tal função devido a sua alta impedância de entrada e baixa impedância de saída e possui ganho unitário [7].

Na saída do subtrator unitário, será fornecido um offset, dada pela diferença entre a tensão de referência e a tensão lida pelo sensor. Esse offset irá para as duas ações do circuito de controle: a ação proporcional e a ação integral.

Na ação proporcional, o offset será multiplicado por um ganho a fim de que esse erro obtido no subtrator seja zerado, porém não é possível zerar o erro apenas com a ação proporcional, o erro irá oscilar em torno de zero, porém atingirá um regime permanente mais rapidamente. Com parâmetros bem ajustados, essa oscilação será mínima. Calcular os parâmetros da ação proporcional seria um processo longo, visto que nenhum dos integrantes do grupo possuem o domínio de controle, por isso o ajuste de ganho foi feito manualmente através da instalação de um potenciômetro na realimentação. Obteve-se uma resposta satisfatória com um ganho de 1.8.

Na ação integral, o offset que ainda resta após a aplicação da ação proporcional é acumulado no capacitor na realimentação do ampop. A ação é responsável por multiplicar a integral do erro pelo ganho integral. Assim como na ação proporcional, o ganho integral foi obtido manualmente através do método de tentativa e erro. Foi instalado um potenciômetro na entrada inversora do ampop. Obteve-se uma resposta satisfatória com um ganho de 178.

Os valores obtidos na ação proporcional e na integral são inseridos no último amplificador do circuito, que está no modo subtrator unitário, onde fará a subtração dos dois resultados, obtendo em sua saída um erro igual a zero. Com o erro zerado, tem-se um sinal de saída do circuito de controle. Esse sinal será inserido no comparador do circuito modulador, e a comparação da onda triangular com a tensão de controle irá gerar o PWM que irá fornecer a potência necessária para que o LED tenha uma intensidade luminosa que, somada com a iluminação ambiente, atenda aos requisitos estabelecidos pela norma.

O fluxograma do circuito de controle é demonstrado pelo fluxograma da figura 6.
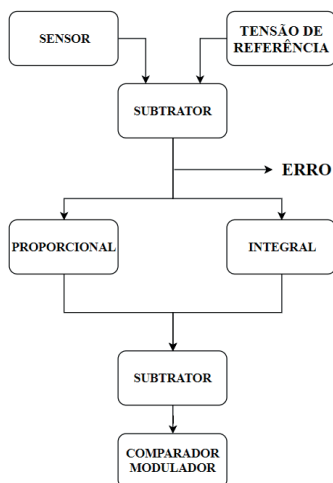
Figura 6 - Fluxograma funcionamento do circuito de controle.

6.3 Interligação dos circuitos

Após projetar, simular e testar virtualmente os circuitos de modulação e de controle, eles foram interligados, obtendo o circuito da figura 7. Conforme descrito nas seções anteriores, o circuito de controle irá fornecer um sinal que será ajustado conforme a leitura do sensor, esse sinal vai ser comparado com uma onda triangular e será gerado um sinal PWM para ajustar a potência fornecida para o LED, para que a iluminação ambiente + iluminação LED mantenham o valor constante de 700 lux durante as oscilações de iluminação.
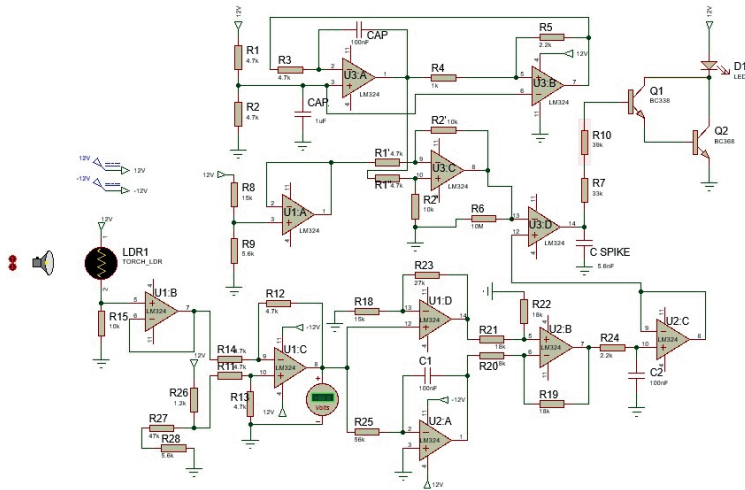
Figura 7 - Circuito final da luminária simulado em Software.

O Funcionamento do circuito final obtido através de estudos e simulações é demonstrado pelo fluxograma da figura 8.
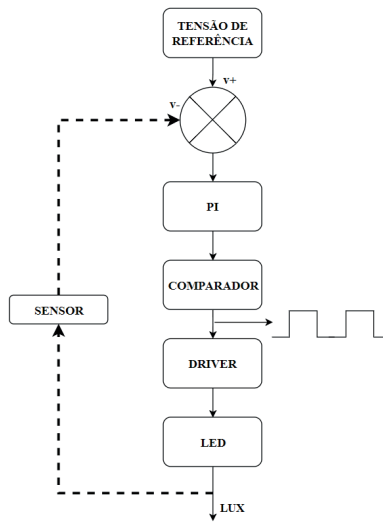
Figura 8 - Fluxograma funcionamento luminária.

7 | RESULTADOS

7.1 Agrupamento e prototipagem dos circuitos

Após os testes, os circuitos de modulação e controle da luminária foram agrupados e prototipados em duas placas de fenolite separadas, conforme figuras 9 e 10, com o intuito de visualizar a implementação e a funcionalidade do projeto.

Figura 9 - Circuito modulador prototipado.
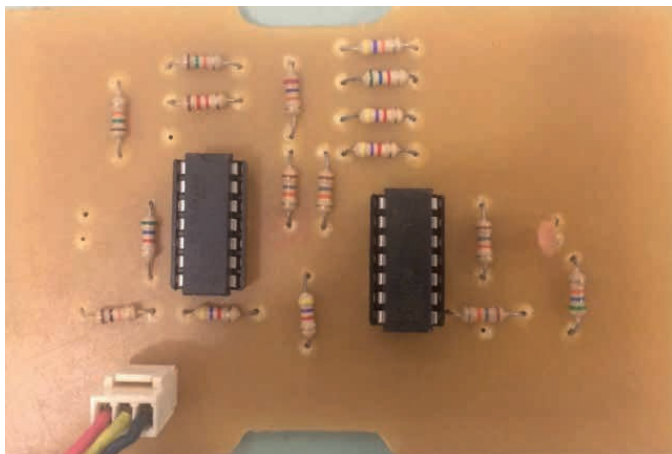
Figura 10 - Circuito de controle prototipado.

7.2 Circuito modulador

Realizada as medições em laboratório com osciloscópio, pôde-se verificar o funcionamento e características do circuito. O oscilador gerou uma onda triangular mostrada na figura 11.
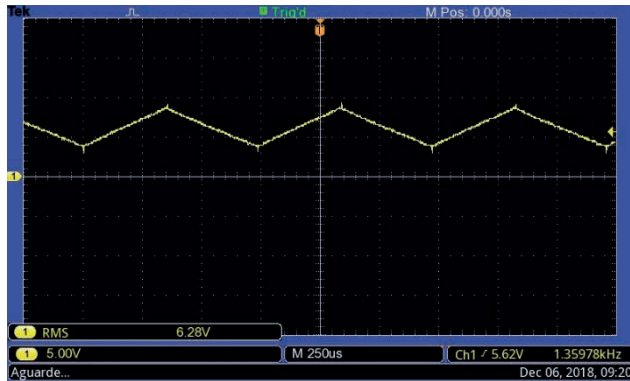
Figura 11 - Onda triangular na saída do oscilador.

A onda triangular apresenta uma amplitude de 6.4V, tendo como valor mínimo 3V e máximo de 9.4V, conforme informações obtidas no osciloscópio, exibidos na figura 12.

Tek Trig'd M Pos: 0.000s

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	740.0us	Larg. Pos	371.0us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	1.351kHz	Larg. Neg	369.0us	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	6.40V	RMS	6.28V	Larg estouro	2.237ms
Médio	6.12V	Cursor RMS	6.28V	Cnt pls pos	3.00
Ciclo RMS	6.40V	Ciclo Tarefa	50.1%	Cnt pls neg	3.00
Mínimo	3.00V	Ciclo neg.	49.8%	Cnt brd dsc	3.00
Máximo	9.40V	Média ciclo	6.24V	Cnt brd asc	3.00
T. subida	324.2us	Média cursor	6.12V	Área	15.30mVs
T. descida	369.6us	Alto	9.40V	Área ciclo	4.621mVs
Amplitude	6.40V	Baixo	3.00V		

1 5.00V M 250us Ch1 ⁄ 5.62V 1.35908kHz
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:21

Figura 12 - Folha de Dados Onda triangular na saída do oscilador.

Após passar pelo subtrator amplificador, foi obtida a onda triangular mostrada na figura 13.
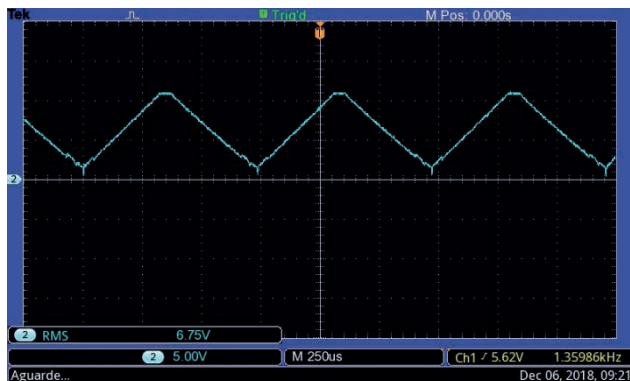
Figura 13 - Onda triangular na saída do subtrator amplificador.

A onda triangular apresenta uma amplitude de 8V, tendo como valor mínimo 0.4V e máximo de 11V, conforme informações obtidas no osciloscópio, exibidos na figura 14.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	737.0us	Larg. Pos	335.0us	Excesso pos.	2.50%
Frequência	1.357kHz	Larg. Neg	402.0us	Excesso Neg.	30.0%
Pico a Pico	10.6V	RMS	6.74V	Larg estouro	2.216ms
Médio	6.10V	Cursor RMS	6.74V	Cnt pls pos	3.00
Ciclo RMS	6.98V	Ciclo Tarefa	45.4%	Cnt pls neg	3.00
Mínimo	400mV	Ciclo neg.	54.5%	Cnt brd dsc	3.00
Máximo	11.0V	Média ciclo	6.36V	Cnt brd asc	3.00
T. subida	213.0us	Média cursor	6.10V	Área	15.24mVs
T. descida	231.0us	Alto	10.8V	Área ciclo	4.686mVs
Amplitude	8.00V	Baixo	2.80V		

Tek Trig'd M Pos: 0.000s
5.00V M 250us Ch1 ∕ 5.62V 1.35909kHz
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:22

Figura 14 - Folha de dados Onda triangular na saída do subtrator amplificador.

O resultado difere do circuito simulado por questões de não existirem componentes ideais, porém o resultado obtido é satisfatório.

7.3 Circuito de controle

Realizadas as medições em laboratório com osciloscópio, pôde-se verificar o funcionamento e características do circuito. Podemos ver na figura 15 que a tensão lida no sensor consegue seguir a tensão de referência.
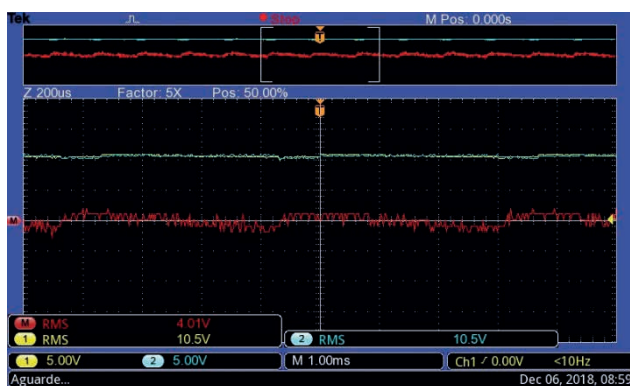
Figura 15 - Tensão no sensor, em amarelo. Tensão de referência, em azul. Erro medido através da função MATH do osciloscópio.

A tensão de referência possui um valor RMS de 10.5V, conforme mostra figura 15 e figura 16.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	80.00us	Larg. Pos	80.00us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	12.50kHz	Larg. Neg	0.000s	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	600mV	RMS	10.5V	Larg estouro	99.52ms
Médio	10.5V	Cursor RMS	10.5V	Cnt pls pos	239
Ciclo RMS	10.5V	Ciclo Tarefa	100%	Cnt pls neg	240
Mínimo	10.2V	Ciclo neg.	0.00%	Cnt brd dsc	128
Máximo	10.8V	Média ciclo	10.5V	Cnt brd asc	127
T. subida	26.66us	Média cursor	10.5V	Área	1.058Vs
T. descida	160.0us	Alto	10.8V	Área ciclo	840.0uVs
Amplitude	600mV	Baixo	10.2V		

Figura 16 - Folha de dados tensão de referência.

A tensão fornecida pelo sensor através da leitura da iluminação tem um valor RMS de 10.5V, conforme folha de dados na figura 17.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	780.0us	Larg. Pos	740.0us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	1.282kHz	Larg. Neg	40.00us	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	1.20V	RMS	10.5V	Larg estouro	97.70ms
Médio	10.5V	Cursor RMS	10.5V	Cnt pls pos	84.0
Ciclo RMS	10.5V	Ciclo Tarefa	94.8%	Cnt pls neg	85.0
Mínimo	9.80V	Ciclo neg.	5.13%	Cnt brd dsc	2.00
Máximo	11.0V	Média ciclo	10.5V	Cnt brd asc	2.00
T. subida	160.0us	Média cursor	10.5V	Área	1.056Vs
T. descida	280.0us	Alto	11.0V	Área ciclo	8.230mVs
Amplitude	1.20V	Baixo	9.80V		

Figura 17 - Folha de dados tensão no Sensor.

O erro calculado através da função MATH do osciloscópio, onde ele realiza a subtração de um sinal do outro, tem um valor RMS de 203mV conforme mostrado na figura 18.

Tek Auto M Pos: 0.000s

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	757.3us	Larg. Pos	444.0us	Excesso pos.	200%
Frequência	1.320kHz	Larg. Neg	313.3us	Excesso Neg.	200%
Pico a Pico	1.00V	RMS	203mV	Larg estouro	99.80ms
Médio	-27.7mV	Cursor RMS	203mV	Cnt pls pos	328
Ciclo RMS	192mV	Ciclo Tarefa	58.6%	Cnt pls neg	329
Mínimo	-600mV	Ciclo neg.	41.3%	Cnt brd dsc	329
Máximo	400mV	Média ciclo	-70.9mV	Cnt brd asc	329
T. subida	16.00us	Média cursor	-27.7mV	Área	-2.776mVs
T. descida	10.66us	Alto	0.00V	Área ciclo	-53.76uVs
Amplitude	200mV	Baixo	-200mV		

1 5.00V 2 5.00V M 10.0ms Ch1 ∕ 0.00V <10Hz
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:03

Figura 18 - Folha de dados erro função MATH.

O erro real medido na saída do subtrator unitário do circuito de controle possui a forma mostrada na figura 19.
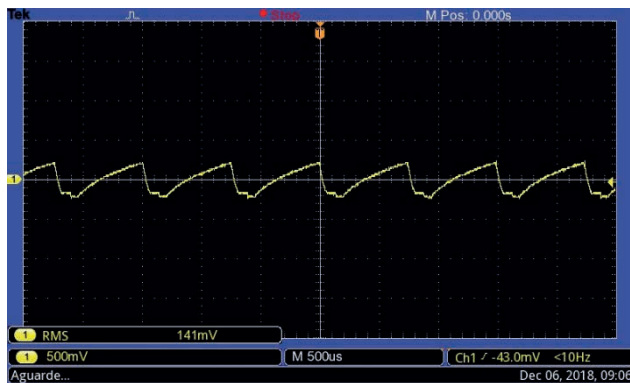
Figura 19 - Erro medido na saída do subtrator.

Podemos ver que o erro medido possui um valor RMS de 142mV, com mínimo de -240mV, máximo de 260mV, e amplitude de 500mV, conforme folha de dados da figura 20.

Tek Auto M Pos: 0.000s

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	750.0us	Larg. Pos	410.0us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	1.333kHz	Larg. Neg	340.0us	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	500mV	RMS	142mV	Larg estouro	4.864ms
Médio	-8.18mV	Cursor RMS	142mV	Cnt pls pos	6.00
Ciclo RMS	141mV	Ciclo Tarefa	54.6%	Cnt pls neg	7.00
Mínimo	-240mV	Ciclo neg.	45.3%	Cnt brd dsc	7.00
Máximo	260mV	Média ciclo	-2.77mV	Cnt brd asc	6.00
T. subida	430.0us	Média cursor	-8.18mV	Área	-40.88uVs
T. descida	62.00us	Alto	260mV	Área ciclo	-2.080uVs
Amplitude	500mV	Baixo	-240mV		

1 500mV M 500us Ch1 ∕ -43.0mV <10Hz
Aguarde... Dec 06, 2018, 09:06

Figura 20 - Folha de dados erro medido no subtrator.

Com base nas medições feitas, é possível visualizar que o circuito de controle satisfaz o seu objetivo de funcionamento e consegue adequar a intensidade luminosa fornecida pela luminária para que a iluminação fique em um nível constante durante todo o tempo de funcionamento.

7.4 Curva de regressão não-linear

Para atestar o funcionamento correto do sensor utilizado, foi feita uma curva de regressão não-linear, onde foram medidos os valores das resistências apresentadas no LDR conforme os níveis de iluminância medidos com um luxímetro. É necessário fazer este levantamento devido a cada LDR ter suas características e respostas únicas, não sendo possível obter valores através de consultas à datasheets. Na figura 21, podemos ver a tabela que foi montada em Excel com os valores necessários para montar a curva de regressão do sensor.

Na primeira coluna temos os valores de resistência medidos no LDR, conforme a iluminância medida que está indicada na segunda coluna. Na terceira coluna estão relacionados os valores de resistência calculados para o LDR conforme a iluminância medida. A fórmula para calcular a resistência do LDR é dada por:

$$R_{ldr} = \frac{R0}{E^n}$$

Onde:

- R0 = Resistência a 1 lux
- E = Intensidade luminosa em lux
- n = Fator individual do LDR, entre 0.6 e 0.

LDR 3 (pequeno)					
Rldr real (k ohms)	E (lux)	Rldr calculado	Erro (Real - calculado)	Erro² =	Sqtot = (Real - média)²
62,30	5	60,64650425	1,65	2,734048196	2855,381
29,60	11	31,53755804	-1,94	3,75413116	429,972
22,60	14	25,82076017	-3,22	10,37329606	188,671
12,89	33	12,68067106	0,21	0,043818604	16,207
10,39	48	9,29371525	1,10	1,201840254	2,328
8,15	70	6,796726067	1,35	1,831350338	0,510
7,07	71	6,717240599	0,35	0,124439195	3,219
5,52	105	4,85583478	0,66	0,44111544	11,184
4,61	116	4,470749587	0,14	0,019390677	18,099
4,82	126	4,174431821	0,65	0,416758273	16,356
3,83	177	3,149108318	0,68	0,463613483	25,344
2,61	284	2,127604906	0,48	0,232705026	39,115
2,60	285	2,12141195	0,48	0,229046522	39,241
2,33	325	1,902487823	0,43	0,182766661	42,696
2,17	365	1,727890894	0,44	0,195460462	44,813
1,454	592	1,157005333	0,30	0,088205832	54,912
0,880	1068	0,709288123	0,17	0,029142545	63,748
0,740	1206	0,641290034	0,10	0,009743657	66,003
0,610	1812	0,45753237	0,15	0,023246378	68,132
0,616	1833	0,453180993	0,16	0,026510029	68,033
0,359	4860	0,201872296	0,16	0,024689115	72,339
8,86			Soma e² = / Soma SQ =	22,4453179	4126,303

Figura 21 - Tabela de Dados Regressão Não-Linear.

Na quinta coluna está calculado o erro quadrático entre os valores medidos e calculados, (Rldr real - Rldr calculado) ². A somatória destes valores será utilizada para encontrar os valores de R0 e n. Para encontrar os valores de R0 e n, foram estimados alguns valores aleatórios para os mesmos e utilizada a ferramenta Solver do Excel para minimizar o erro quadrático através da alteração dos parâmetros R0 e n, a fim de aproximar os valores calculados dos valores reais. Como resultado, foram obtidos os seguintes valores:

- R0 = 230.4 kΩ
- n = 0.8293

Plotando o gráfico da curva de regressão não-linear obtemos as curvas conformes figura 22.

Figura 22 - Curva de Regressão Não-Linear.

Para assegurar a confiabilidade dos valores obtidos, foi utilizado o método do Coeficiente de Determinação. Também chamado de R^2, é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados [6].

A fórmula do R^2 é dada por:

$$R^2 = 1 - \frac{e^2}{g^2}$$

$$e^2 = \sum_{1}^{n} (R_{ldr} \text{ medido} - R_{ldr} \text{ calculado})^2$$

$$g^2 = \sum_{1}^{n} (R_{ldr} \text{ medido} - \text{média dos valores})^2$$

Realizando os cálculos, foi obtido um $R^2 = 0.9946$, o que indica que o sensor utilizado no projeto tem alta confiabilidade.

7.5 Comparador e saída do controlador PI

Foram obtidos os seguintes sinais referentes as tensões de saída do controlador PI, em amarelo, e do PWM gerado pelo comparador, em azul.
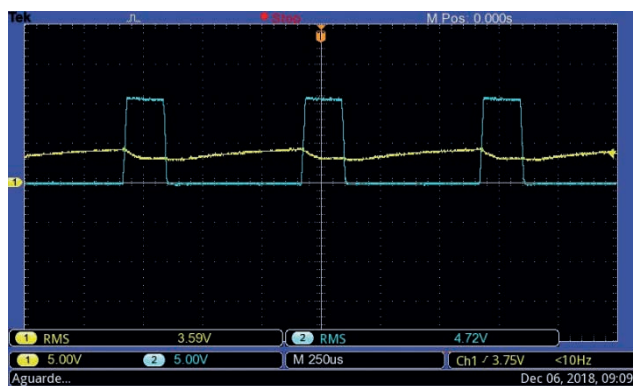
Figura 23 - Saída controlador PI, em amarelo. Saída PWM comparador, em azul.

O sinal do controlador possui uma boa estabilidade, com um valor RMS de 3.2V no ponto que foi medido, com uma amplitude de 1.8V, com mínimo de 2.2V e máximo de 4V, conforme mostrado na figura 24.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	69.00us	Larg. Pos	67.50us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	14.49kHz	Larg. Neg	1.500us	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	1.80V	RMS	3.20V	Larg estouro	2.409ms
Médio	3.17V	Cursor RMS	3.20V	Cnt pls pos	8.00
Ciclo RMS	2.91V	Ciclo Tarefa	97.8%	Cnt pls neg	7.00
Mínimo	2.20V	Ciclo neg.	2.17%	Cnt brd dsc	1.00
Máximo	4.00V	Média ciclo	2.91V	Cnt brd asc	1.00
T. subida	415.0us	Média cursor	3.17V	Área	7.924mVs
T. descida	166.0us	Alto	4.00V	Área ciclo	200.8uVs
Amplitude	1.80V	Baixo	2.20V		

Figura 24 - Folha de dados sinal controlador.

Neste mesmo ponto, o sinal PWM gerado pela comparação do sinal do controlador com a onda triangular tem um Duty cycle de 17.1%, com um valor RMS de 4.09V, conforme mostrado na figura 25.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	751.2us	Larg. Pos	128.5us	Excesso pos.	1.85%
Frequência	1.331kHz	Larg. Neg	622.7us	Excesso Neg.	1.85%
Pico a Pico	11.2V	RMS	4.09V	Larg estouro	1.631ms
Médio	1.52V	Cursor RMS	4.09V	Cnt pls pos	3.00
Ciclo RMS	4.31V	Ciclo Tarefa	17.1%	Cnt pls neg	2.00
Mínimo	-400mV	Ciclo neg.	82.8%	Cnt brd dsc	3.00
Máximo	10.8V	Média ciclo	1.71V	Cnt brd asc	3.00
T. subida	14.33us	Média cursor	1.52V	Área	3.798mVs
T. descida	11.33us	Alto	10.6V	Área ciclo	1.281mVs
Amplitude	10.8V	Baixo	-200mV		

Figura 25 - Folha de dados sinal PWM.

A fim de verificar a faixa de frequência de operação da luminária, foram coletados a frequência do circuito quando a luminária estava quase totalmente apagada e quando ela estava em seu brilho máximo.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	762.6us	Larg. Pos	8.500us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	1.311kHz	Larg. Neg	754.1us	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	3.40V	RMS	323mV	Larg estouro	1.536ms
Médio	194mV	Cursor RMS	323mV	Cnt pls pos	3.00
Ciclo RMS	319mV	Ciclo Tarefa	1.11%	Cnt pls neg	2.00
Mínimo	-200mV	Ciclo neg.	98.8%	Cnt brd dsc	2.00
Máximo	3.20V	Média ciclo	199mV	Cnt brd asc	2.00
T. subida	9.333us	Média cursor	194mV	Área	485.7uVs
T. descida	17.00us	Alto	3.20V	Área ciclo	151.8uVs
Amplitude	3.40V	Baixo	-200mV		

Figura 26 - Folha de dados PWM com Duty cycle a 1.1%

Com o Duty cycle do PWM a 1.1%, podemos ver pela folha de dados da figura 26 que a frequência de operação é de, aproximadamente 1.3kHz.

Na figura 27, podemos ver na folha de dados que com o Duty cycle do PWM em 100%, a frequência de operação é de 500kHz, trazendo a faixa de operação entre 1.3 e 500 kHz.

Medir	Valor	Medir	Valor	Medir	Valor
Período	2.000us	Larg. Pos	2.000us	Excesso pos.	0.00%
Frequência	500.0kHz	Larg. Neg	0.000s	Excesso Neg.	0.00%
Pico a Pico	600mV	RMS	10.9V	Larg estouro	2.496ms
Médio	10.9V	Cursor RMS	10.9V	Cnt pls pos	711
Ciclo RMS	10.9V	Ciclo Tarefa	100%	Cnt pls neg	712
Mínimo	10.6V	Ciclo neg.	0.00%	Cnt brd dsc	36.0
Máximo	11.2V	Média ciclo	10.9V	Cnt brd asc	37.0
T. subida	1.000us	Média cursor	10.9V	Área	27.28mVs
T. descida	1.000us	Alto	11.2V	Área ciclo	21.80uVs
Amplitude	600mV	Baixo	10.6V		

Figura 27 - Folha de dados PWM com Duty cycle a 100%.

Ao final dos testes, foi montada uma estrutura física para a luminária, conforme figura 28.

Figura 28 - Estrutura física da luminária.

Após a implementação do projeto foi obtido uma luminária de baixo consumo. O circuito da figura 7 foi o circuito final montado e testado. Conforme os testes, os circuitos mostraram um comportamento satisfatório e que atendeu os objetivos do projeto. O projeto final teve um custo de aproximadamente R$80,00 para ser implementado, custo qual possibilita o acesso ao protótipo para a comunidade em geral, porém o circuito montado é inviável para a comercialização devido as novas tecnologias embarcadas presentes no mercado atual. O projeto se mostra como um projeto de média/alta dificuldade de implementação e de baixo custo, sendo viável a sua implementação e prototipagem para a

elaboração de estudos mais aprofundados, ou adaptar o mesmo para plataformas digitais de tecnologia embarcada.

REFERÊNCIAS

[1] MALVINO, A; BATES, D. J. **Eletrônica.** 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. v. 1.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:** Iluminação de Ambientes de Trabalho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/vilmair/instalacoes-prediais-1/normas-e-tabelas-de-dimensionamento/NBRISO_CIE8995-1.pdf/view. Acesso em: 28 nov. 2018.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5413:** Iluminância de Interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM802/NBR5413.pdf. Acesso em: 28 nov. 2018.

[4] POMILIO, José Antenor. **ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**. Publicação FEEC 01/98 – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas. 2009.

[5] PHILIPS [*NXP Semiconductors*]. **LM324 *Datasheet***. 1995. Disponível em: http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17871/PHILIPS/LM324.html. Acesso em: 01 nov. 2018.

[6] R^2. In: WIKIPEDIA: the free encyclopedia. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/R². Acesso em: 01 nov. 2018.

[7] BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR OFF GRID EM UMA RESIDÊNCIA RURAL

Data de aceite: 03/07/2023

Elielton Christiano de Oliveira Metz
Faculdade Uniamérica Descomplica
Foz do Iguaçu – Paraná
http://lattes.cnpq.br/9176061167363501

Julio Correia
Faculdade Uniamérica Descomplica
Foz do Iguaçu – Paraná

Luciana Paro Scarin Freitas
Faculdade Uniamérica Descomplica
Foz do Iguaçu – Paraná
http://lattes.cnpq.br/2554057558293125

RESUMO: Os sistemas off-grid são comumente utilizados em áreas remotas, rurais ou em locais onde o acesso à rede elétrica é limitado ou inviável. Eles podem ser usados para fornecer eletricidade em residências, fazendas, escolas, hospitais, estações de telecomunicações e outras instalações que requerem energia. Sistema de armazenamento de energia: Normalmente, são utilizadas baterias para armazenar o excesso de energia gerada durante os períodos de alta geração (como durante o dia, em caso de energia solar) e fornecer eletricidade durante os períodos de baixa geração (como à noite ou em dias nublados). As baterias garantem um fornecimento contínuo de energia quando a geração não é suficiente. Demonstrar a viabilidade da aplicação de um sistema de aterramento em uma residência. Apresentar um projeto de dimensionamento de instalação de aterramento seguindo a demanda de consumo do cliente. Desenvolver o projeto de instalações, elaborar um memorial de cálculo para determinar a demanda, aterramento e os cabos que serão utilizados.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema solar, Off Grid, Aterramento

IMPLEMENTATION OF NA OFF GRID SOLAR SYSTEM IN A RURAL RESIDENCE

ABSTRACT: Off-grid systems are commonly used in remote, rural areas or in places where access to the electrical grid is limited or unfeasible. They can be used to supply electricity in homes, farms, schools, hospitals, telecommunications stations and other facilities that require power. Energy storage system: Typically, batteries are used to store excess energy generated during peak generation periods (such as during the day in the case of solar power) and to supply electricity during low

generation periods (such as at night or on cloudy days). Batteries ensure a continuous supply of energy when generation is not enough. Demonstrate the feasibility of applying a grounding system in a residence. Present a grounding installation sizing project following the customer's consumption demand.
Develop the installation project, prepare a calculation memorial to determine the demand, grounding and cables that will be used.
KEYWORDS: Solar system, Off Grid, Grounding.

INTRODUÇÃO

Primordialmente, o aterramento é um sistema que consiste no direcionamento de possíveis correntes de fuga para a terra. Tal direcionamento é feito através da conexão das instalações elétricas a um componente condutor. Este, por sua vez, é responsável por dispersar a corrente para a Terra.

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade, causada pelo "efeito fotovoltaico", fenômeno descoberto por Edmond Becquerel em 1839, o qual é definido como sendo o estabelecimento de uma tensão elétrica em um material semicondutor quando exposto à luz visível. O sistema responsável por essa conversão é denominado de "célula fotovoltaica". Para aumentar os níveis de tensão e corrente, várias células fotovoltaicas são conectadas em associações série-paralelo, constituindo um conjunto denominado de "módulo fotovoltaico". A associação de vários módulos resulta no "painel fotovoltaico", que constitui a unidade fundamental de um sistema fotovoltaico (CRESESB-CEPEL, 2014).

Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI): também denominados de sistemas *off-grid*, caracterizam-se por não se conectarem à rede elétrica, sendo geralmente construídos com um propósito local e particular, visando atender um consumo de energia elétrica específico. Em vista disso, a estimativa da demanda energética deve ser bem estimada (CRESESB-CEPEL, 2014).

Os SFVI típicos são constituídos pelo bloco gerador, que contém os módulos fotovoltaicos, o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte; bloco de condicionamento de potência, que contém o inversor, o controlador de carga e os dispositivos de proteção/supervisão/controle; bloco de armazenamento, constituído pelos acumuladores elétricos e/ou outras formas de armazenamento. Esse bloco é imprescindível, visto que é responsável por atender a demanda de energia elétrica nos períodos quando a geração é nula ou insuficiente. Apesar da larga oferta no mercado, a bateria eletroquímica ainda é o dispositivo mais utilizado.

Para os cálculos e levantamentos pertinentes ao projeto foi utilizado as informações técnicas dos equipamentos e as informações referente ao seu local de aplicação. Através dessas informações é possível calcular de forma precisa os equipamentos necessários para o desenvolvimento do projeto geração de energia a partir de placas fotovoltaicas em

modo OFF-GRID.

Para a elaboração do projeto em 3D foi utilizado a plataforma online ‘’*Solar Edge”.*

O presente projeto tem como o objetivo principal solucionar o problema de falta de energia elétrica sofrido pelos integrantes da família em uma residência.

REVISÃO DE LITERATURA

Ao planejar um sistema off-grid, é necessário dimensionar corretamente a capacidade dos componentes de geração, armazenamento e controle para atender às demandas de energia da instalação. É importante considerar o consumo de energia, a disponibilidade e confiabilidade das fontes de energia renováveis, bem como as características de carga específicas do local

Fatura de seu consumo mensal.

Histórico de Consumo e Pagamento

Mês	kWh	Dt.Pgto.	Valor
10/2021	1149	16/11/2021	784,66
09/2021	1616	13/10/2021	1.061,40
08/2021	1134	13/09/2021	704,17
07/2021	1004	13/08/2021	589,95
06/2021	1030	13/07/2021	511,89
05/2021	879	14/06/2021	416,56
04/2021	757	13/05/2021	346,09
03/2021	456	13/04/2021	210,44
02/2021	467	15/03/2021	216,41
01/2021	484	17/02/2021	235,55
12/2020	556	13/01/2021	270,70
11/2020	533	14/12/2020	236,14

FIGURA 1 (índice de consumo dos 12 meses)

Taxa de eficiência de irradiação solar

ÂNGULO	INCLINAÇÃO	IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL (kWh/m².dia)													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Med	Delta
Plano Horizontal	0° N	6,2	5,75	5,17	4,19	3,26	2,87	3,09	4,09	4,31	5,23	6,02	6,41	4,72	3,54
Ângulo igual a latitude	25° N	5,56	5,49	5,38	4,84	4,11	3,79	4	4,94	4,63	5,13	5,49	5,65	4,92	1,87
Maior média anual	20°N	5,75	5,6	5,4	4,76	3,99	3,64	3,86	4,82	4,62	5,2	5,65	5,86	4,93	2,22
Maior mínimo mensal	45° N	4,6	4,78	5,01	4,86	4,37	4,13	4,31	5,11	4,43	4,56	4,6	436	4,61	0,98

Figura 2 (Irradiação solar diária média mensal da UFCG)

Considerando que o local de instalação é uma área rural, as placas fotovoltaicas irão ficar em campo aberto aproveitando o máximo da luz solar diária sem intervenção de sombras.

DIMENSIONAMENTO DAS PLACAS

Para o dimensionamento das placas fotovoltaicas foi considerado que o sistema será totalmente autônomo, ou seja, não será conectado à rede da concessionaria.

Foi levado em conta somente os três últimos messes a pedido do cliente pois antes não havia consumo real.

Consumo:

$$Demanda = \frac{ConsumoMes\ 8 + ConsumoMes9 + ConsumoMes10}{3}$$

$$Demanda = \frac{1134 + 1616 + 1149}{3}$$

Demanda= 1299,66 = 1300kWh/mês

Para este consumo foi realizado um memorial de cálculo da seguinte maneira.

Potência da placa = 550W

Irradiação média = 4.93

Perca = 20%

$$CalcDia = 550 * 4.93 * 0.8 = 2.16kWh\ /\ dia$$

$$CalcMes = 2.1692 * 30 = 65{,}07kW/mês$$

$$\boldsymbol{Total\ de\ placas = \frac{Consumo}{CalcMes}}$$

$$\boldsymbol{ttpl = \frac{1300000}{65076} = 19,97 = 20\ placas}$$

Para o sistema seria necessárias 20 placas para suprir a demanda anual e uma redução considerável na conta de energia elétrica, porém o sistema solicitado pelo cliente é um sistema que é desintegrado da rede assim tendo que considerar o mês que menos gera energia ser superior a media dos 03 meses calculados somando com o carregamento das baterias no período diurno.

Considerando o pior mês foi dimensionado 30 placas fotovoltaicas de 550W cada uma.

Potência da placa = 550W

Irradiação média = 3.64

Perca = 20%

$$CalcDia = 550 * 3.64 * 0.8 = 1{,}60kWh\ /\ dia$$

$$CalcMes = 2.1692 * 30 = 48{,}04kW/mês$$

$$\boldsymbol{Geração = 30 * 48,04 = 1441,4kWh/\ mês}$$

Então contudo foi dimensionado 30 Placas fotovoltaicas de 550w

As ligações das placas foram da seguinte maneira:

4 Agrupamentos sendo:

1 e 3: 9 painéis ligados, 3 placas em serie ligadas com 3 ramificações em paralelo, totalizando 120VCC e 39 A.

2 e 4: 6 painéis ligados, 3 placas em serie ligadas com 2 ramificações em paralelo, totalizando 80V e 26 A.

Para este projeto foi dimensionado 04 controladores MPPT's de 40 A ajustado em 48V
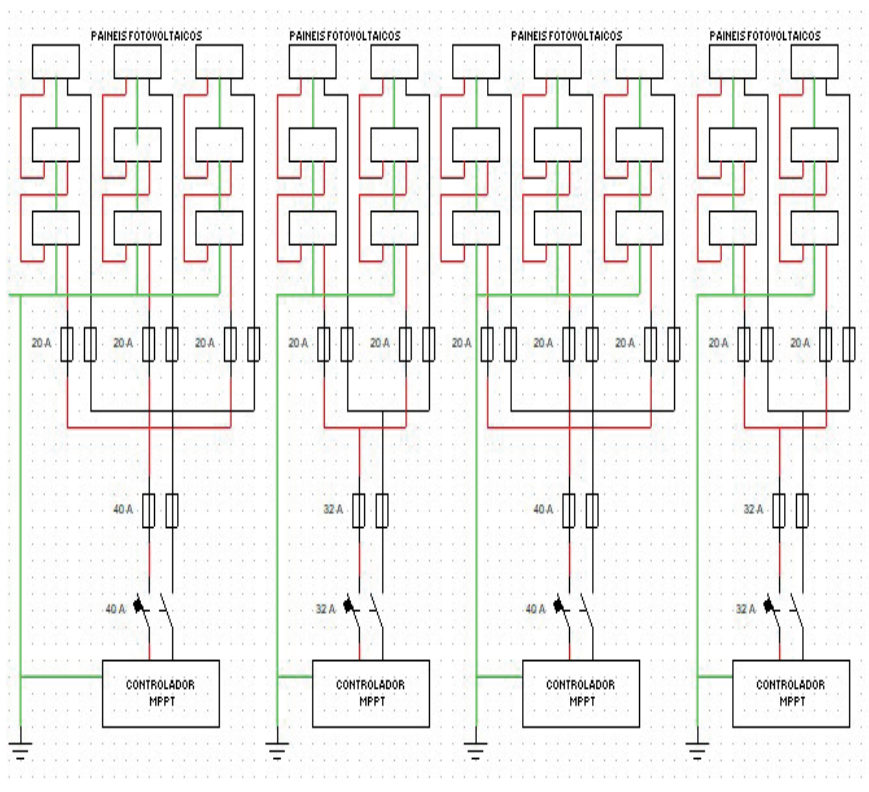
FIGURA 3 (painéis fotovoltaicos CadeSimu)

DIMENSIONAMENTO DAS BATERIAS E INVERSORES

Para esse sistema foi dimensionado um banco de baterias com autonomia de 12 horas.

$$Consumo\ Diário = \frac{1300\ (consumo\ mensal)}{30\ (dias)} = 43{,}33kW$$

$$Consumo\ em\ kWp = \frac{43{,}33\ (consumo\ diario)}{4{,}93\ (\ Irrad\ média) * 0.8\ (percas)} = 10{,}99kWp$$

$$Corrente\ no\ controlador = \frac{10{,}99(kWp)}{48\ (tensão\ do\ banco\ de\ baterias)} = 228A$$

$$Corrente\ total\ dos\ bancos = \left(\frac{228}{0{,}7(descarga\ profunda)}\right) * 12h = 3909A$$

$$Total\ de\ baterias = \frac{3909}{220Ah\ (modelo\ da\ bateria)} = 18\ baterias$$

Para que seja possível a instalação de 5 bancos de baterias é necessária o acréscimo de 02 baterias extras para fazer as ligações e cada banco ter 48v.

$$It = 20 * 220 = 4400Ah$$

Dimensionado 5 bancos de baterias com 04 baterias em serie em cada totalizando 48V e 220A
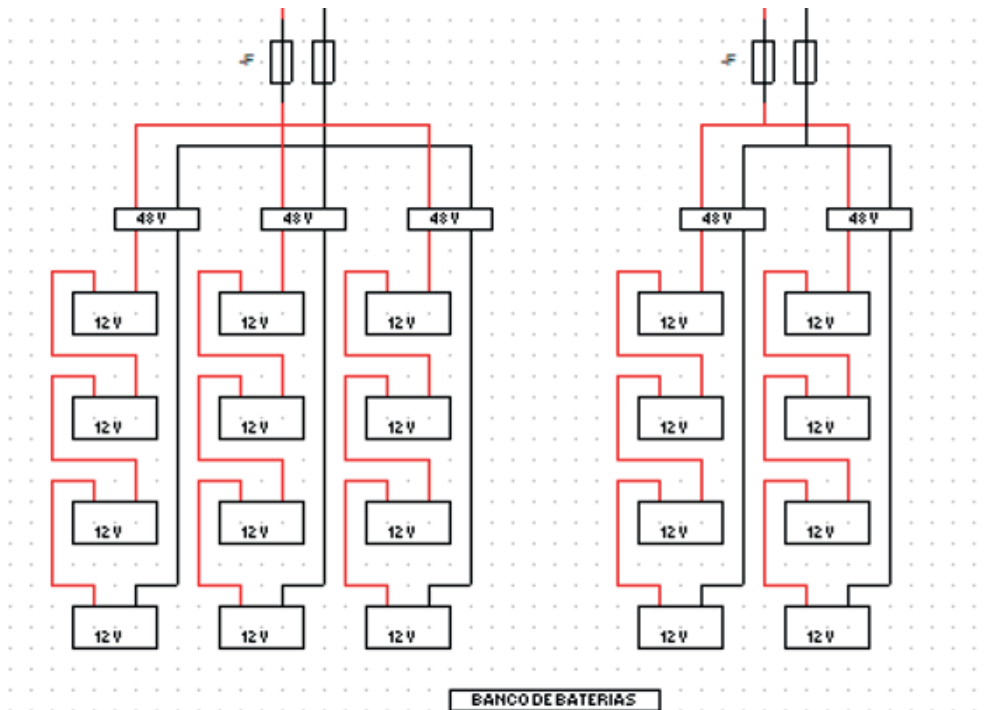
FIGURA 4 (banco de baterias CadeSimu)

Para o dimensionamento dos inversores foi multiplicado a potência das placas pela quantidade assim foi dimensionado 02 inversores de 10KVA cada.

6.7 Sistema de armazenamento. Para estimar a quantidade de energia a ser armazenada e o número de baterias que irá compor o banco, informações quanto ao consumo de energia em Ah/mês e capacidade do banco de baterias são requeridas, as quais foram obtidos considerando as especificações abaixo

Tipo de bateria a ser utilizado:	chumbo-ácido;
Eficiência da bateria:	90%;
Profundidade de descarga diária:	50%;
Autonomia do sistema sem recarga:	12 horas;
Quantidade de energia fornecida:	650 kWh/mês;
Temperatura média local:	30°C;
Tensão do banco de baterias:	48 V.

CIRCUITO COMPLETO DO SISTEMA

Circuito começa pela geração nas placas fotovoltaicas que ligadas em ramais, passando pelas strings de proteção, mandam tensão para os controladores que se encarregam de estabilizar a tensão em 48V
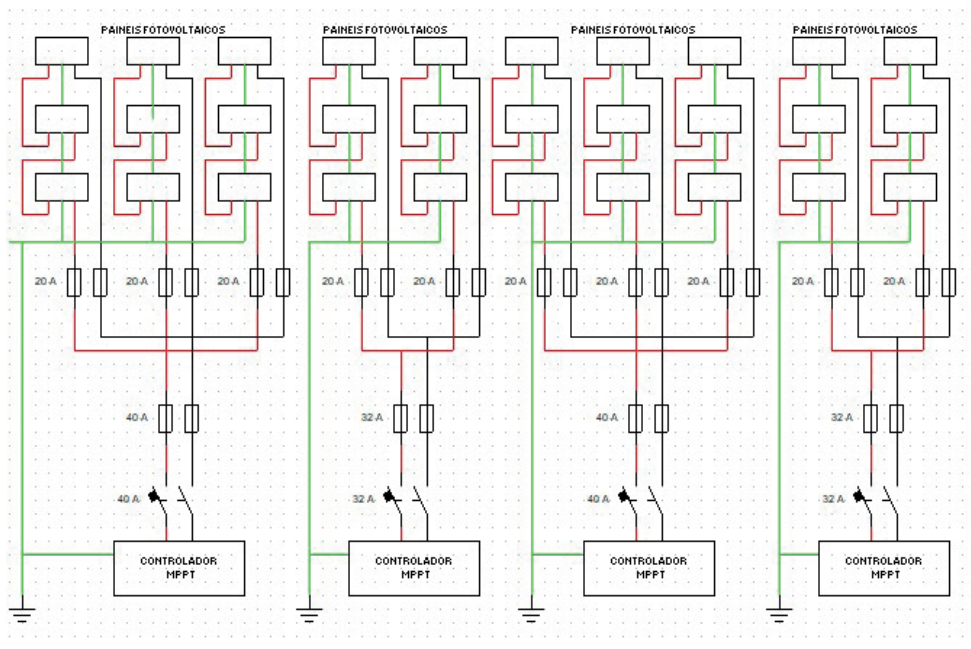
FIGURA 5 (painéis fotovoltaicos CadeSimu)

Já os bancos de bateria são ligados em paralelo com as placas para a garantia de fornecimento em horários de não-geração.

Assim seguindo do controlador e já estabilizado a tensão é destinada aos inversores no nosso caso são 02 de 10KVA que se encarrega de fornecer energia elétrica para a residência.
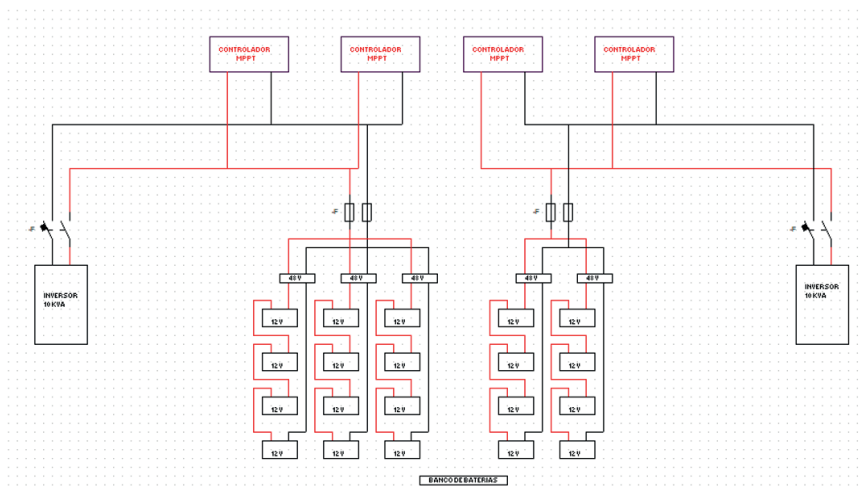
FIGURA 6 (banco de baterias CadeSimu)
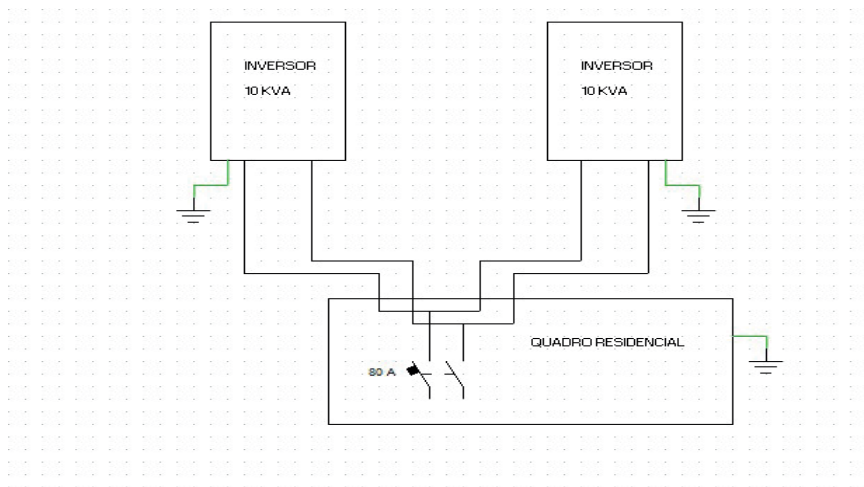
FIGURA 7 (quadro de carga CadeSimu)

LISTA DE MATERIAIS

MATERIAL	QUANTIDADE	PREÇO EM REAIS
Inversor 10Kva SPF10KTHVM	02	23.956,77
CONTROLADOR MPPT 40A 48V	04	4.396,00
PLACAS SOLARES 550W sunova	30	29.940,00
BATERIA 12V 220Ah MOURA	20	33.180,00
PAR CONECTOR MC4 TIPO Y 3VIAS	02	141,98
INVERSOR DE FREQUENCIA DANFOSS VLT HVAC BASIC DRIVE FC 101	17	423,30
CABO FLEXIVEL 6mm² PRETO	150M	1.093,50
CABO FLEXIVEL 6mm² VERMELHO	50M	364,50
CABO FLEXIVEL 10mm² PRETO	50M	349,00
CABO FLEXIVEL 10mm² VERMELHO	50M	349,00
CABO FLEXIVEL 6mm² AZUL	100M	546,75
CABO FLEXIVEL 16mm² VERDE	100M	546,75
ESTRUTURA SOLO 6 MODULOS -3,45mm	2	5.845,00
ESTRUTURA SOLO 9 MODULOS -3,45mm	2	8.767,50
KIT CONTRAVAMENTOS ESTRUTURA SOLO	2	424,60
TOTAL = R$ 110.324,65		

RETORNO FINANCEIRO

Por se tratar de um sistema off grid o retorno financeiro é baseado no valor total do projeto dividido pela média mensal de custo que o cliente desembolsava todos os meses pagando energia + taxas para concessionaria.

Sendo assim o custo efetivo do projeto ficou em:

R$ 122.054,65 / 850,07 (valor médio 3 meses) = 143,58 ≅ 144 meses = 12 Anos

Mas levando em consideração os benefícios por ele instalado, terá um retorno além de financeiro e econômico, também um conforto pessoal.

Considerando um período de manutenção dos equipamentos comece dentro dos primeiros 15 anos até o cliente pagar o projeto não terá de se preocupar com gastos programados de manutenção do sistema.

Ao fim desse prazo terá somente gasto com manutenção, não obtendo mais dívidas, com consumo de energia da companhia responsável

ANÁLISE DE PERDAS

Para esse sistema foi analisado uma estimativa de perda de captação de reflexo solar.

levando em consideração os fatores:

Sombreamento: O sombreamento afeta o desempenho dos sistemas fotovoltaicos em vários aspectos. Módulos parcialmente sombreados são propícios para formação de pontos quentes, devido à iluminação não uniforme sobre as células, onde a potência gerada acaba sendo dissipada nas células sombreadas, por onde flui uma corrente reversa relativamente alta, causando aquecimento do módulo de forma que o material da célula possa se danificar

Curvas de corrente versus tensão de módulos fotovoltaicos sem sombreamento (esquerda) e com sombreamento parcial (direita)
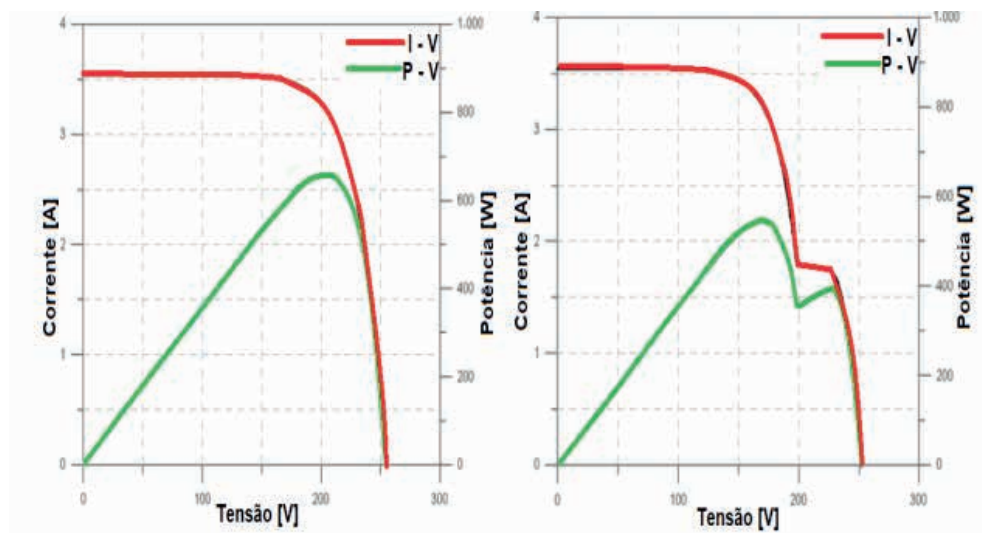
FIGURA 8 (gráfico de efeito da temperatura)

Temperatura: A temperatura do módulo é um parâmetro que tem grande influência no comportamento de um sistema fotovoltaico, pois altera a eficiência do sistema e a energia gerada.

Corrente versus tensão de um módulo fotovoltaico para diferentes temperaturas
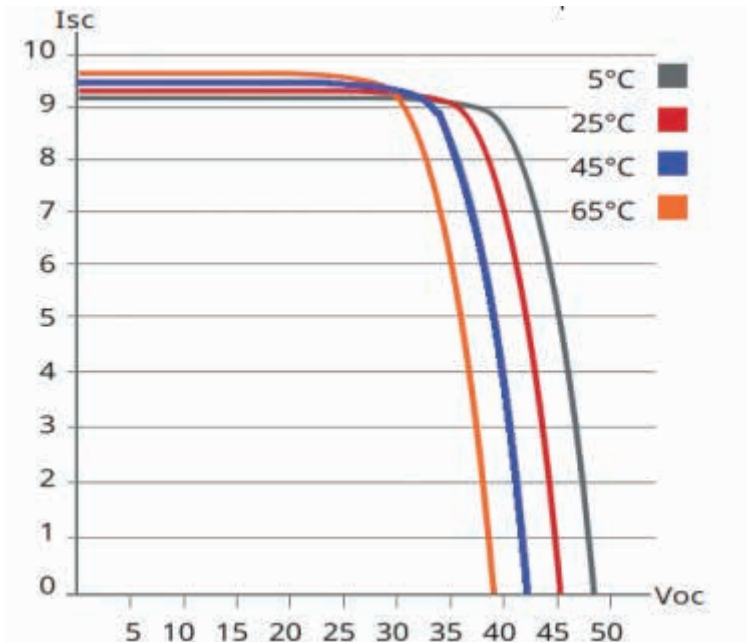
Figura 9 (gráfico efeito temperatura)

Perdas ôhmicas no cabeamento cc: As perdas são geralmente mais altas do lado CC, pelo trajeto geralmente ser mais longo, por serem instaladas conexões, chaves e dispositivos de proteção, contribuindo com o aquecimento e ocorrência do efeito Joule.

Perdas na fiação elétrica por efeito Joule
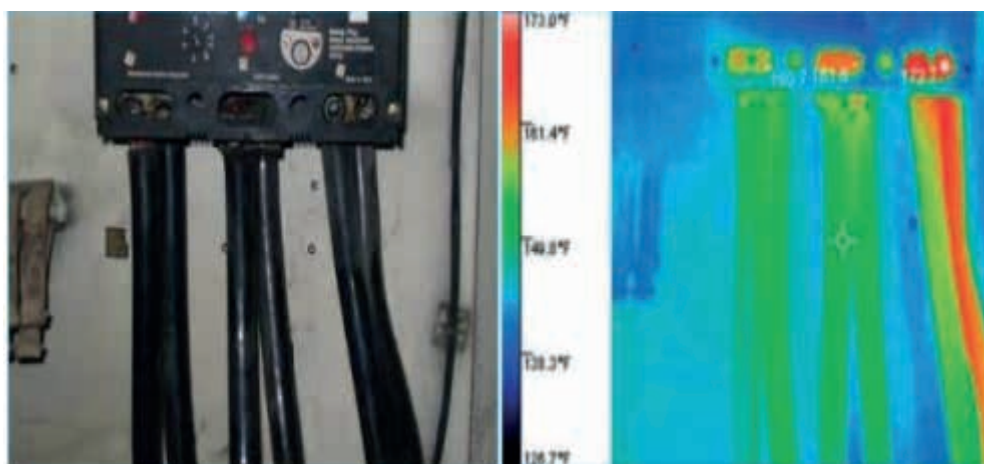
Figura 10 (fonte FLUKE, 2019)

Perdas por eficiência dos inversores: A eficiência de conversão é uma medida das perdas durante a conversão de CC para CA. A eficiência de conversão é definida como a

relação entre o componente fundamental da saída de energia CA do inversor, dividido pela entrada de energia CC.
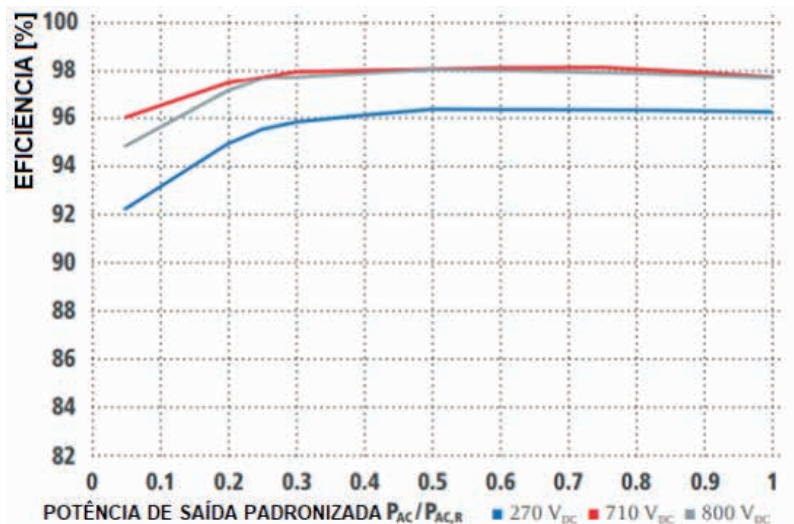
Figura 11 (gráfico efeito temperatura)

INSTALAÇÃO

A instalação do sistema empregado na propriedade do cliente ficaria da seguinte maneira:

Figura 12 (Figura gerada no app SolarEdge)

Para a inclinação orientada foi adotado as seguintes dimensões:
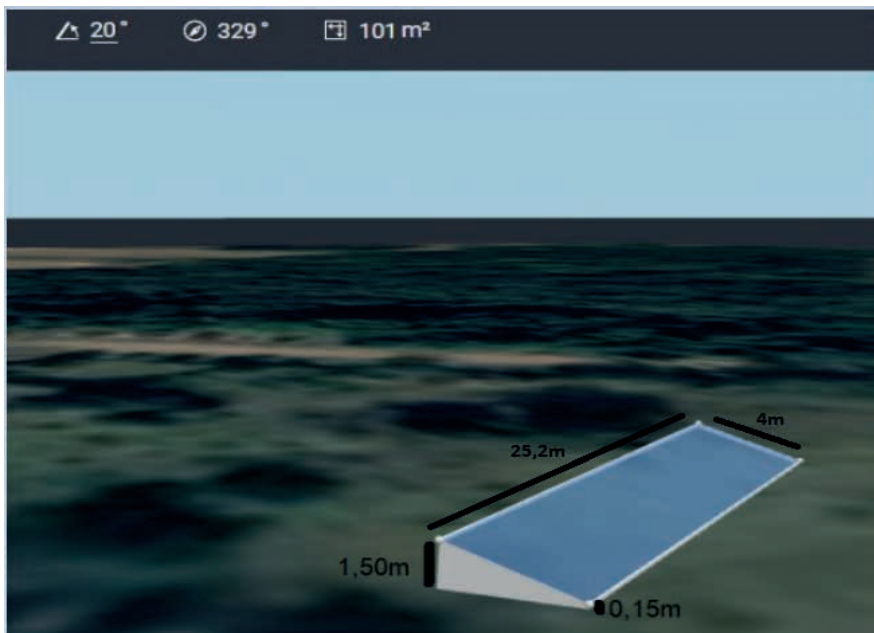
Figura 13 (Figura gerada no app SolarEdge)

Irradiação projetada em amarelo e as 30 Placas Solares
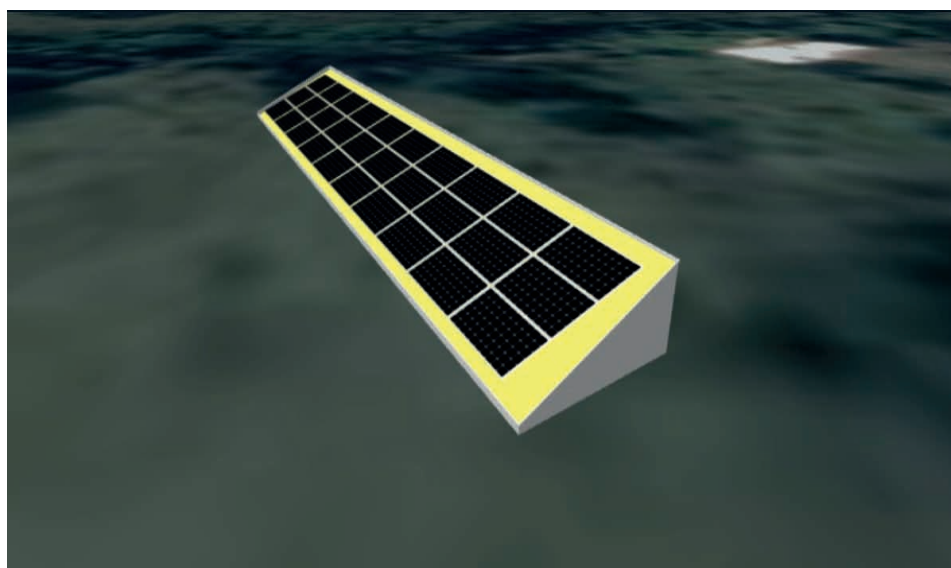
Figura 14 (Figura gerada no app SolarEdge)

CONCLUSÃO

O processo de execução do projeto apresentado neste trabalho demonstrou a importância crescente dos sistemas fotovoltaicos como fonte de geração distribuída, e em particular, a importância da etapa de dimensionamentos para o êxito desse tipo de sistema, seja do ponto de vista técnico ou econômico.

REFERÊNCIAS

CRESESB-CEPEL, 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. Edição Revisada e Atualizada. Rio de Janeiro.

SOLAREDGE-Technologies Inc., 2022.

HIDRELÉTRICA: EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO

Data de aceite: 03/07/2023

André Luís Freitas de Lima
Engenharia Elétrica – Centro Universitário São Lucas

Ewerton Castro Pinheiro de Lima
Engenharia Elétrica – Centro Universitário São Lucas

Flávio Alves Ferreira
Engenharia Elétrica – Centro Universitário São Lucas

Ivanilson Alves Montes
Engenharia Elétrica – Centro Universitário São Lucas

Marcos Aurélio Ferreira de Souza
Engenharia Elétrica – Centro Universitário São Lucas

Matheus Martins Feliciano
Engenharia Elétrica – Centro Universitário São Lucas

Nathalia Pimentel
Engenharia Elétrica – Centro Universitário São Lucas

RESUMO: O objetivo deste estudo é discorrer sobre a eficiência das hidrelétricas. De forma específica esse trabalho busca identificar quais são as energias limpas e renováveis mais aplicadas no Brasil e seu estágio atual em relação a outros países; analisar como o Brasil está em relação ao Sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU; comparar o custo da produção de Energia Limpa frente a outros tipos de energias; e por fim, analisar a eficiência das hidrelétricas. Por se tratar de um tema atual onde ainda há muito a ser pesquisado e explicado, este estudo ganha uma importância ainda maior. Esse trabalho também será relevante para a comunidade cientifica porque disponibilizará mais referenciais bibliográficos para trabalhos futuros acerca de sua temática principal. O procedimento metodológico utilizado nesta pesquisa é uma revisão bibliográfica qualitativa descritiva, visto que é amparado por uma revisão teórica. Uma vez definidos os objetivos de pesquisa, deu-se início à coleta de informações com base no estudo de bibliografias nacionais e internacionais.
PALAVRAS-CHAVE: Usina hidrelétrica, energia, equipamento, eficiência.

ABSTRACT: The objective of this study is to discuss the efficiency of hydroelectric plants. Specifically, this work seeks to identify which are the most applied clean

and renewable energies in Brazil and its current stage in relation to other countries; analyze how Brazil is in relation to the UN's Seventh Sustainable Development Goal; compare the cost of producing Clean Energy against other types of energy; and finally, analyze the efficiency of hydroelectric plants. Because it is a current topic where there is still much to be researched and explained, this study gains even greater importance. This work will also be relevant to the scientific community because it will provide more bibliographic references for future work on its main theme. The methodological procedure used in this research is a descriptive qualitative bibliographic review, since it is supported by a theoretical review. Once the research objectives were defined, the collection of information began based on the study of national and international bibliographies.
KEYWORDS: Hydroelectric plant, energy, equipment, efficiency.

INTRODUÇÃO

A transição para energias renováveis é essencial para combater as emissões de poluentes e gases de efeito estufa provenientes das fontes fósseis, que representam uma ameaça ao abastecimento global. O Brasil se destaca como um país com grande potencial para energias renováveis. Nas últimas décadas, as pequenas centrais hidrelétricas têm despertado o interesse de governantes e ambientalistas devido aos benefícios sociais, econômicos e ambientais que oferecem.

O sistema elétrico brasileiro opera de forma coordenada para reduzir os custos gerais de produção de energia elétrica. O governo e institutos de pesquisa têm investido na automação de usinas hidrelétricas, visando reduzir custos, melhorar a produção, aumentar a produtividade, qualidade e segurança. O desenvolvimento adequado da capacidade de geração de energia é estrategicamente importante para o progresso do país, dada a crescente demanda por eletricidade.

A abundante potencialidade hidrelétrica do Brasil tem sido aproveitada ao longo dos anos por meio da construção de grandes usinas hidrelétricas, que representam uma oportunidade de transformar energia hidráulica em energia elétrica. No entanto, ao considerar a construção de uma usina hidrelétrica, é necessário avaliar os impactos ambientais envolvidos e os equipamentos necessários para garantir uma fabricação eficiente de energia. Isso envolve a busca por alternativas de baixo custo, a fim de promover a sustentabilidade e o funcionamento adequado das usinas.

Este estudo tem como objetivo analisar a eficiência das hidrelétricas, levando em consideração as energias limpas e renováveis mais aplicadas no Brasil e seu estágio atual em comparação com outros países. Além disso, busca-se avaliar o cumprimento do Brasil em relação ao Sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU, comparar os custos de produção de energia limpa com outros tipos de energia e analisar a eficiência das hidrelétricas.

A produção de energia limpa tem sido objeto de discussões e estudos devido aos problemas ambientais causados pela poluição e emissão de gases poluentes, responsá-

veis pelo aquecimento global. O uso de fontes renováveis torna-se a melhor opção para obter resultados positivos sem causar danos ambientais. A energia limpa é definida como proveniente de fontes naturais e renováveis, sendo não poluente e inesgotável.

Considerando que ainda há muito a ser pesquisado e explicado sobre esse tema atual, este estudo ganha importância. Além disso, será relevante para a comunidade científica, fornecendo referências bibliográficas para pesquisas futuras.

A metodologia utilizada neste estudo é uma revisão bibliográfica qualitativa descritiva, que se baseia em uma revisão teórica. Os objetivos de pesquisa foram definidos e, em seguida, foram coletadas informações por meio do estudo de bibliografias nacionais e internacionais. A pesquisa bibliográfica é um estudo sistemático realizado com base em material publicado em livros, revistas, artigos e outras fontes acessíveis ao público. Ela fornece uma base sólida para qualquer tipo de pesquisa.

A pesquisa bibliográfica desempenha um papel fundamental na estruturação de qualquer trabalho científico, moldando o restante do estudo. As produções acadêmicas podem ser acessadas tanto em formato eletrônico quanto manual, ampliando as possibilidades de acesso a informações relevantes.

A pesquisa, como um processo formal e sistemático, busca descobrir respostas e comprovar hipóteses por meio da formulação de questionamentos e problemas. A abordagem metodológica deste estudo é qualitativa exploratória, relacionando autores que estudam essa temática e destacando os benefícios proporcionados pelo uso de fontes de energia renovável, não apenas nas residências, mas em diversas áreas práticas que acompanham as mudanças socioeconômicas, históricas, políticas e culturais das nações.

Além de livros, também foram examinados sites e artigos que fundamentam a clareza da temática abordada. Considerando que esse é um tema atual em constante evolução, há muito espaço para pesquisas futuras e expansão do conhecimento.

Em resumo, este estudo busca analisar a eficiência das hidrelétricas, considerando a aplicação das energias limpas e renováveis no Brasil em comparação com outros países, o cumprimento do país em relação aos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU, os custos de produção de energia limpa em comparação com outros tipos de energia e a avaliação da eficiência das hidrelétricas. A pesquisa se baseia em uma revisão bibliográfica qualitativa descritiva, utilizando materiais nacionais e internacionais, como livros, revistas, artigos e sites, para fornecer uma base teórica sólida e contribuir para estudos futuros nessa área.

DESENVOLVIMENTO

As energias limpas e renováveis mais aplicadas no Brasil

As energias renováveis são fundamentais no combate às mudanças climáticas, pois

são obtidas de fontes naturais inesgotáveis e não contribuem para o aquecimento global. Exemplos incluem vento, luz solar, água, calor geotérmico, marés e biomassa, todas em constante renovação (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

O Brasil lidera o uso de energia renovável na América Latina e se destaca globalmente. De acordo com o Banco Mundial, em 2017, as energias renováveis representaram 17,5% do consumo total de energia no mundo. Embora isso esteja abaixo da meta de 30% estabelecida para 2030, o Brasil é o país que mais consome energia renovável em relação ao consumo total de energia, especialmente para eletricidade, calor e transporte. Em junho de 2018, 87,8% da produção total de energia do país veio de fontes renováveis, superando o desempenho do Canadá (65%) e da Espanha (39%). Isso traz boas notícias para o Brasil e seu compromisso com energias limpas (BONDARIK et al., 2018).

Segundo o Ministério Minas e Energia, as principais fontes de energia renovável no Brasil são as usinas hidrelétricas e de biomassa. A energia hidrelétrica representa mais de 60% da produção total de energia, sendo o país o segundo maior produtor e detentor da segunda maior capacidade instalada no mundo, atrás apenas da China. No entanto, a parcela da produção de eletricidade proveniente de hidrelétricas diminuiu de mais de 80% no final dos anos 90 para 68% em 2016, devido às secas ocorridas desde os anos 2000. A usina de Itaipu é a segunda maior do mundo, depois da Três Gargantas na China. A expansão do potencial hidrelétrico ainda não foi totalmente explorada, principalmente nas regiões do Noroeste e na Bacia Amazônica. Foram construídas extensas linhas de transmissão de alta tensão para conectar esses recursos às áreas costeiras consumidoras de energia (BONDARIK et al., 2018).

O Brasil possui o maior potencial hidrelétrico das Américas, estimado em 3.040 TWh/ano de forma teórica e 818 TWh/ano de forma economicamente viável. Mais de 50% desse potencial já é explorado, totalizando 428,6 TWh em 2011. Projetos em construção somavam 21.100 MW no final de 2011, com produção média estimada de 41 TWh/ano, enquanto projetos em estudo totalizavam 68.000 MW, com produção média estimada de 327 TWh/ano. O potencial economicamente explorável de pequenas hidrelétricas (<30 MW) é estimado em 11,2 TWh/ano, dos quais 6,28 TWh/ano (56%) já foram explorados em 2008, e os projetos adicionais acrescentariam 2,5 TWh/ano (SANTOS et al., 2015).

O potencial hidrelétrico do Brasil está concentrado na bacia do rio Amazonas, enquanto a demanda de eletricidade é maior na costa sudeste. Essa disparidade resultou em desafios para a infraestrutura de transmissão de eletricidade devido às grandes distâncias entre as regiões (SANTOS et al., 2015).

Por outro lado, as outras fontes que contribuíram para o consumo de energia do Brasil a partir de práticas renováveis foram parques eólicos e usinas solares, que contribuíram com 1% dessa produtividade (MENDONÇA et al., 2012).

> No âmbito nacional e em relação à crise energética existente, as perspectivas quanto ao uso da energia eólica são cada vez maiores e apesar de estarem

> em crescimento no Brasil, no mundo ela já movimenta cerca de 2 bilhões de dólares. No Brasil o Ceará foi o primeiro estado a se manifestar em relação a essa energia e assim estimulou vários outros estados brasileiros que hoje tem 20,3MW de capacidade instalada em território nacional conectadas a rede elétrica (SILVA; BRITO, 2016 p. 21).

Em 2017, o Brasil liderou o consumo de energia renovável em relação ao consumo total. No setor de calor, representou 45%, deixando a França em segundo lugar com 18%. No setor de transporte, o Brasil também ficou em primeiro lugar, com 20% do consumo total de energia, seguido pela França com 7% e pela Alemanha com 5%. Globalmente, a geração de calor a partir de energias renováveis representou 9% da produção total (BONDARIK et al., 2018).

O Sol emite radiação eletromagnética na qual gama, X, luz visível, infravermelho, microondas e ondas de rádio estão presentes, dependendo da frequência de emissão. Todos esses tipos de radiação eletromagnética carregam energia. O nível de irradiância medido na superfície da Terra depende do comprimento de onda da radiação solar (PEREIRA, E. B., et al., 2006).

> O Brasil é privilegiado em energia solar, com grande incidência de raios solares e reservas de quartzo para a produção de células solares. Os benefícios incluem baixa emissão de gases poluentes, mínima manutenção, uso em locais remotos e longa vida útil. No entanto, há impactos ambientais durante a produção e limitações de uso em períodos chuvosos e noturnos. (AGUILAR et al., 2012 p. 35).

A matriz energética do Brasil é diversificada, incluindo água, vento, sol, petróleo, carvão, urânio, gás natural e lenha. Com um potencial renovável inexplorado, domínio de tecnologias de refino de silício e ciclo nuclear, o país possui ativos para um futuro energético promissor, dependendo de comprometimento político e capacidade de financiamento (SANTOS et al., 2015).

Brasil e o sétimo objetivo de desenvolvimento sustentável da ONU

Em 2015, os Estados Membros adotaram os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) durante a Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, substituindo os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM). Os ODS consistem em 17 objetivos interligados que visam erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e promover a prosperidade até 2030. Eles reconhecem a interação entre diferentes áreas de intervenção e a importância de equilibrar os pilares econômico, social e ambiental da sustentabilidade. Os ODS servem como uma estrutura para orientar políticas nacionais e cooperação internacional. Seu progresso é interdependente e a sustentabilidade deve ser mantida em todos os aspectos (IPEA, 2019).

O papel do Brasil na implementação do Diário 2030 é crucial. As políticas públicas inovadoras adotadas pelo Brasil são percebidas como contribuições significativas para a promoção global do progresso sustentável nas dimensões econômica, formal e ambiental

(conforme LOSEKANN e HALLACK, 2018).

O governo tem avançado no cumprimento do ODS 7 com o Programa Nacional de Biocombustíveis Inteligentes (RenovaBio) e tecnologias de ponta. Os biocombustíveis, como etanol, biodiesel e biogás, produzidos a partir de biomassa renovável, são uma opção sustentável com menor impacto ambiental. Iniciativas como o Proálcool, de 1975, e o PNPB, de 2004, impulsionaram o uso desses biocombustíveis.

Hoje, a gasolina e o diesel contêm, respectivamente, 27% de etanol e 8% de biodiesel em sua composição, com previsão de aumento para 40% e 10% (REN21, 2017 s.p.). A liderança nacional no âmbito da Agenda 2030 e dos ODS resultou no documento "Diretrizes Orientadoras da Ação Brasileira", elaborado por meio de seminários com representantes da sociedade civil, reuniões com representantes municipais organizadas pela Secretaria de Relações Institucionais da Presidência da República e pelo Ministério das Cidades, e deliberações do Grupo de Trabalho Interministerial sobre a Agenda 2020, que envolveu 27 ministérios e órgãos do governo federal (IPEA, 2019).

Após a consolidação das Metas e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, a ONU elaborou uma lista de 232 indicadores de monitoramento. A lista da ONU contém 244 indicadores, mas, considerando as duplicidades existentes, a lista possui 232. Essa lista foi finalizada durante uma conferência realizada de 7 a 10 de março de 2017. A própria ONU publica parcialmente uma série de dados, contando com suas agências especializadas. Os 232 indicadores definidos não são necessariamente aplicáveis a todos os contextos nacionais, devido às características específicas de cada país (IPEA, 2019).

O sétimo objetivo de Desenvolvimento Sustentável foi estabelecido para garantir o acesso universal a serviços de energia confiáveis, sustentáveis e modernos a um custo acessível. Esse objetivo visa aumentar o acesso abrangente aos serviços de energia e promover o uso de energias renováveis, com o apoio de assistência e desenvolvimento externo, além das condições essenciais de governança e tecnologias de energia limpa (IPEA, 2019).

A proporção da população global com acesso à eletricidade aumentou de 79% em 2000 para 85% em 2012. No entanto, mesmo com esses avanços, 1,1 bilhão de pessoas ainda estavam privadas desse serviço básico em 2012. Em 2014, cerca de 3 bilhões de pessoas, mais de 40% da população mundial, dependiam de combustíveis poluentes e insalubres para cozinhar (IPEA, 2019).

Entre 2010 e 2012, as energias renováveis tiveram um progresso significativo, com um aumento anual de 4%. A intensidade energética total também apresentou uma melhoria constante de 1,3% ao ano, no período de 2000 a 2012. As regiões em desenvolvimento contribuíram de forma significativa para os 68% de economia de energia alcançados durante esse período, e a Ásia emergiu como um ator-chave no impulso em direção à energia sustentável.

Os objetivos de desenvolvimento sustentável estão intrinsecamente ligados à

demanda por energia. Infelizmente, mais de um bilhão de pessoas no mundo ainda não têm acesso à eletricidade, enquanto 40% dependem de subprodutos animais, carvão vegetal ou lenha para cozinhar, resultando em problemas respiratórios e gerando consideráveis resíduos (IPEA, 2019).

Embora as Metas de Progresso do Milênio tenham perdido força, o ODS 7 visa aumentar a proporção de energia renovável global, reduzindo o uso de combustíveis fósseis, que ainda representam mais de 80% do consumo mundial. O objetivo é dobrar os avanços na eficiência energética (IPEA, 2019). Energia limpa inclui eólica, geotérmica, hidráulica, solar e biomassa, como etanol, biodiesel e biogás. Os combustíveis de biomassa são obtidos a partir de resíduos e o CO2 liberado é capturado durante o cultivo, minimizando danos ao ambiente. A produção de energia elétrica e biomassa aumentou exponencialmente, especialmente em áreas sem acesso à energia. A Rede de Políticas de Energias Renováveis para o Século XXI (REN21, 2017) confirma este impulso.

No Brasil, no que se refere ao sétimo objetivo de Desenvolvimento Sustentável, cerca de 65% dos indicadores globais já foram produzidos, quase 20% dos indicadores não possuem dados sobre o andamento de sua produção e 15% não possuem uma metodologia global (Figuras 1 e 2) (BRASIL, 2019).
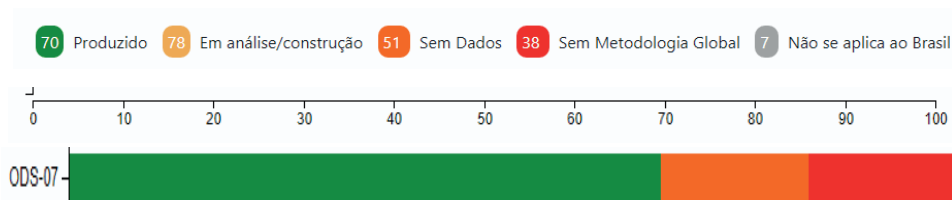
Figura 1. Síntese da Produção dos Indicadores Globais – Objetivo 7 (%)

Fonte. BRASIL (2019).
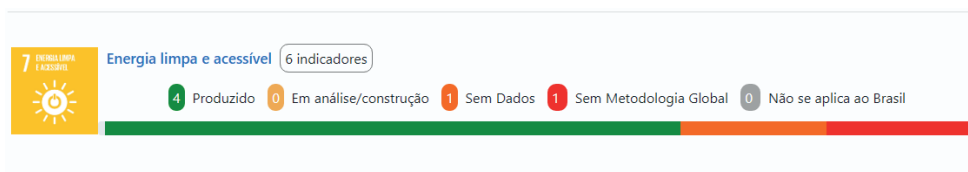
Figura 2. Status do Brasil de acordo com o Objetivo 7

Fonte. BRASIL (2019).

O indicador 7.b.1, referente a investimentos em eficiência energética em relação ao PIB e transferências financeiras para infraestruturas sustentáveis, não possui metodologia ou melhorias.

O indicador 7.a.1, sobre fluxos financeiros internacionais para ajuda em energias limpas, também não tem data ou melhorias. Por outro lado, o indicador 7.3.1 de intensidade energética e o indicador 7.2.1 de participação de energias renováveis foram desenvolvidos.

O indicador 7.1.2 sobre acesso a combustíveis limpos e o indicador 7.1.1 sobre acesso à eletricidade também foram fabricados. A definição de indicadores para os objetivos pós-2015 é importante para alcançar a Agenda 2030, considerando aspectos humanos, sociais e ambientais do progresso.

Usina hidrelétrica

A usina hidrelétrica é um conjunto de obras e equipamentos que transforma a energia hidráulica em energia elétrica, aproveitando o potencial de um rio com desníveis e fluxo de água. Uma usina hidrelétrica é composta por partes como a potência hidráulica disponível, potência utilizável, transporte dos componentes ao parque gerador, custo das obras civis, equipamentos diretos e auxiliares, manutenção, rendimento dos equipamentos (turbina e gerador), custo das áreas inundáveis e valores das áreas no entorno do reservatório, além de aspectos geológicos e localização da barragem.

A água captada na lagoa é conduzida até a casa de força por canais ou condutos metálicos. Após passar pela turbina hidráulica, a água retorna ao rio através do canal de fuga. Assim, a potência hidráulica se transforma em potência mecânica, fazendo a turbina girar. A potência mecânica é então convertida em potência elétrica pelo gerador acoplado à turbina. A energia é transportada por cabos ou barras condutoras até o transformador, onde sua voltagem é corrigida. Em seguida, é transmitida aos centros de consumo por linhas de transmissão, sendo ajustada por transformadores para uso pelos consumidores (FURNAS, 20).

A potência da água depende da altura de queda na usina, que é a diferença de nível entre o reservatório e o rio abaixo. Isso pode variar de acordo com as vazões de entrada e saída. A geração de energia elétrica depende principalmente da altura de queda e do consumo na turbina (COLNAGO, 2011).

De acordo com Vichi e Mansor (2009), a energia hidráulica é uma das maiores fontes renováveis de energia, representando 17% de todas as fontes renováveis em 2006. É explorada em mais de 160 países, mas Brasil, Canadá, China, Rússia e Estados Unidos são responsáveis pela maioria da geração mundial. No Brasil, a Resolução nº 9.648, de 27 de maio de 1998, define a diferenciação entre pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e grandes centrais hidrelétricas (GCHs), considerando PCHs aquelas com potência instalada entre 1.000 kW e 30.000 kW (BRASIL, 1998).

Energia Hidrelétrica uma Fonte de Energia Renovável Eficiente

Mohammad Mehedi Hasan et al. (2018) estudaram o impacto das mudanças climáticas na geração hidrelétrica na bacia do Rio Jubones, no Equador. Foi constatado que usinas hidrelétricas com baixa capacidade de armazenamento são mais vulneráveis às mudanças climáticas, pois uma maior capacidade requer uma operação mais complexa. Neste estudo, os dados de velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar foram obtidos a partir de estatísticas mensais de informações meteorológicas, utilizando sete

estações pluviométricas e três estações de temperatura. Foi observado que a geração de energia hidrelétrica aumentará durante a estação chuvosa, enquanto a usina enfrentará uma escassez significativa de energia durante a estação seca (Hasan et al., 2018).

Marco Casini (2015) conduziu um estudo sobre a captação de energia de hidrossistemas in-pipe em escala urbana e predial. Foi constatado que esses sistemas hidrelétricos podem operar em diversas condições de carga e vazão. Casini classificou-os em dois designs: sistemas internos, nos quais o rotor fica completamente dentro da seção do tubo, com apenas o gerador projetando-se para fora, e sistemas externos, nos quais o rotor está localizado em um conduto secundário contornando o principal. Esses sistemas não são afetados pelas condições climáticas.

Vergila Dadu et al. (2016) investigaram conceitos relacionados a pequenas centrais hidrelétricas. Eles descobriram que o vórtice no fluxo resulta em perda de energia e propuseram diminuir o diâmetro do tubo desde a entrada até a usina, a fim de evitar que o nível de acesso à água fique abaixo do nível do tubo de desvio. Eles concluíram que melhores resultados econômicos poderiam ser obtidos com essa abordagem.

Renata Archetti (2011) realizou uma pesquisa sobre a viabilidade de uma microcentral hidrelétrica nacional para uso doméstico, com capacidade instalada inferior a 100 kW. O objetivo era avaliar sua viabilidade e acessibilidade. Foi proposto aproveitar a vazão disponível em um sistema de água, utilizando um gerador de turbina Pelton acoplado a um ímã permanente de corrente contínua, que alimenta um inversor conectado em paralelo diretamente à residência, visando economizar energia.

Elbatran et al. (2015) estudaram sistemas de energia hidrelétrica e turbinas. A capacidade de energia e instalação são critérios para classificar usinas hidrelétricas, incluindo tecnologias de reservatório, fio d'água, armazenamento bombeado, tecnologia in stream e vórtice gravitacional. A eficiência geral da estação é de cerca de 90%, mas o custo inicial é alto, embora a operação e manutenção sejam de baixo custo, tornando-se uma opção eficiente a longo prazo. O estudo apresentou tipos de turbinas hidrelétricas, seus componentes e desempenho, destacando a importância da hidrelétrica para preocupações comerciais, econômicas e ambientais globais (ELBATRAN et al., 2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No sistema de geração de energia hidrelétrica, usamos potencial ou cinética ou ambas as formas de energia e as convertemos em forma de energia elétrica. A água corrente do rio ou a água armazenada no reservatório passa por um túnel através do qual um tanque de compensação também está conectado. O tanque de compensação funciona como um neutralizador de pressão em sistemas de fluxo de água de hidrelétricas para amortecer a variação de pressão excessiva. Depois passa por uma comporta. Os condutos forçados fornecem um meio de isolamento de fluxos e regulam o fluxo de água enquanto o

entregam a instalações de gerenciamento de resíduos ou usinas de energia.

A turbina tem vários no. de pás conectadas a ele que gira com velocidade por causa da energia potencial ou cinética da água. Em seguida, o gerador conectado à turbina converte essa energia mecânica na forma de energia elétrica.

No geral concluiu-se que a energia hídrica é uma das formas mais eficientes de fonte renovável de energia. Através deste sistema, a eletricidade pode ser gerada muito facilmente com a ajuda de usinas hidrelétricas domésticas ou em tubos.

Embora a usina hidrelétrica exija um custo de instalação enorme em escala maior, em comparação com isso, ela nos fornece uma grande quantidade de energia a longo prazo. As usinas hidrelétricas podem ter cerca de 90% de eficiência, o que não pode ser alcançado por nenhuma das fontes renováveis de geração de energia. De acordo com os aspectos futuros, os sistemas hidrelétricos domésticos ou em tubulação podem ser usados em edifícios de vários andares.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, R. S. et al. Energia Renovável: Os Ganhos E Os Impactos Sociais, Ambientais E Econômicos Nas Indústrias Brasileiras. *In:* Encontro Nacional De Engenharia De Produção, XXXII, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul: UFRGS, 2012. **Anais...** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2012_tn_stp_16-7_970_19670.pdf>. Acesso em: 23 de março de 2023.

AMARAL, J. J. F. **Como fazer uma pesquisa bibliográfica.** Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2007.

BONDARIK, R. et al. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência,** vol. 43, no. 10, 2018.

BRASIL. **Relatório dos Indicadores para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Secretaria Especial de Articulação Social. Disponível em: <https://indicadoresods.ibge.gov.br/relatorio/sintese>. Acesso em: 23 de março de 2023.

GANNOUM, E. S. O desenvolvimento da indústria de energia eólica no Brasil: aspectos de inserção, consolidação e sustentabilidade. **Cadernos Adenauer**, no. 3, 2014, pp. 57-71.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, no. 72, 2007, pp. 6-15.

HOLLNAGEL, H. C.; ARAÚJO, L. J. S.; BUENO, R. L. P. Analysis of the contribution of small residential care centers for the elderly to reduce the socio environmental impact and foster entrepreneurship in brazilian megacities (São Paulo**). RISUS – Journal on Innovation and Sustainability**, vol. 7, no. 3, 2016, pp. 3-16.

MELO, E. Fonte eólica de energia: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. **Estudos Avançados**, vol. 27, no. 77, 2013, pp. 125-142.

MENDONÇA, A. T. B. B. de. et al. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **Cad. EBAPE.BR**, vol.10, no.3, Rio de Janeiro, 2012.

MORESI E. **Metodologia da Pesquisa**. Universidade Católica de Brasília – UCB. Brasília. Março. 2003. Disponível em: http://ftp.unisc.br/portal/upload/ com_arquivo/1370886616.pdf. Acesso em: 14 de março de 2023.

SILVA, M. S. T.; BRITO, S. O. Impactos ambientais associados a construção de empreendimentos elétricos no setor de distribuição de energia. **Revista Faroeciância**, vol. 1, no. 1, 2016, pp. 266-280.

TOMALSQUIN, M. T. Energia renovável: Hidráulica, biomassa, eólica, solar e oceânica. **EPE**, 2016, 452p.

CAPÍTULO 6

ARQUITETURAS E TOPOLOGIAS DE CONTROLADORES ADAPTATIVOS, FUZZY-PID E FCM-PID EM FERMENTADOR ALCOÓLICO INDUSTRIAL

Data de aceite: 03/07/2023

Márcio Mendonça
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/5415046018018708

Emerson Ravazzi Pires da Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/3845751794448092

Ricardo Breganon
Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho
Jacarezinho - PR
http://lattes.cnpq.br/2441043775335349

Matheus Gil Bovolenta
Acadêmico - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/1518815195539638

Marcos Antônio de Matos Laia
Departamento De Ciência Da Computação – UFSJ
Minas Gerais - MG
http://lattes.cnpq.br/7114274011978868

Bruno Oliveira Rosa
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Acadêmico - Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/5010826876808074

Rodrigo Rodrigues Sumar
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/1461760661483683

Vicente de Lima Gongora
Faculdade de Tecnologia SENAI Londrina
Londrina – PR
http://lattes.cnpq.br/6784595388183195

Carlos Alberto Paschoalino
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/0419549172660666

Michelle Eliza Casagrande Rocha
Universidade Norte do Paraná -Unopar
Engenheira projetista elétrica
Londrina-Pr
http://lattes.cnpq/4411484670091641

Andre Luis Shiguemoto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/9243656534211182

Kazuyochi Ota Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Mestrando - PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/3845751794448092

Andressa Haiduk
Dimension Engenharia
Ponta Grossa - PR
http://lattes.cnpq.br/2786786167224165

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1857241899832038

Marcio Aurélio Furtado Montezuma
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Engenharia Mecânica (DAMEC)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/2487283169795744

Ângelo Feracin Neto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/0580089660443472

RESUMO: Neste artigo, o controle de um processo complexo de fermentação alcoólica que é caracterizado por não-linearidade e comportamento de fase não mínima. Para estabelecer a validade de nossa abordagem, começamos a discussão fornecendo uma visão geral de estudos relevantes e um breve histórico das técnicas utilizadas, incluindo métodos heurísticos. Além disso, oferecemos uma breve introdução à teoria Fuzzy e aos Mapas Cognitivos Fuzzy (FCM) para fornecer contexto. O sistema de controle é implementado usando uma arquitetura

de controle adaptativo que utiliza dois métodos, ou seja, Fuzzy e FCM, para ajustar os parâmetros do controlador PID. Esses sistemas inteligentes ajustam de forma eficaz os ganhos proporcionais e derivativos do controlador. Para avaliar o desempenho desses sistemas, comparamos o Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo (ITAE) e o Erro Quadrático Integral (ISE) em duas campanhas de fermentação distintas. Por fim, tiramos conclusões com base nos resultados encontrados e propomos direções potenciais para pesquisas futuras, visando aprimorar ainda mais o controle do processo de fermentação.
PALAVRAS-CHAVE: Controle Inteligente, Mapas Cognitivos Fuzzy, Processo de Fermentação Alcoólica, Controlador PID

ARCHITECTURES AND TOPOLOGIES OF ADAPTIVE, FUZZY-PID, AND FCM-PID CONTROLLERS IN INDUSTRIAL ALCOHOL FERMENTER

ABSTRACT: In this paper, the control of a complex alcoholic fermentation process that is characterized by non-linearity and non-minimal phase Beauvoir. To establish the validity of our approach, we begin the discussion by providing an overview of relevant studies and a concise historical background of the utilized techniques, including heuristic methods. Furthermore, we offer a brief introduction to Fuzzy theory and Fuzzy Cognitive Maps (FCM) to provide context. The control system is implemented using an adaptive control architecture that employs two methods, namely Fuzzy and FCM, for tuning the parameters of the PID controller. These intelligent systems effectively adjust the proportional and derivative gains of the controller. To evaluate the performance of these systems, we compare the Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) and Integral of Square Error (ISE) across two distinct fermentation campaigns. Finally, we draw conclusions based on the findings and propose potential directions for future research, aiming to further enhance the control of the fermentation process.
KEYWORDS: Intelligent Control, Fuzzy Cognitive Maps, Alcoholic Fermentation Process, PID Controller.

1 I INTRODUÇÃO

O controle inteligente é uma subárea emergente da engenharia de controle que utiliza várias técnicas de inteligência computacional para desenvolver controladores que possam lidar com sistemas complexos e não lineares. Entre as técnicas utilizadas estão redes neurais artificiais, lógica fuzzy, algoritmos genéticos, entre outros (ZHOU, D., QIAN, C. E WEI, Q., 2016).

Segundo Passino e Yurkovich (1997), o controle inteligente se destaca por sua capacidade de lidar com sistemas com dinâmicas incertas ou que estejam em constante mudança, com parâmetros que mudam ao longo do tempo, ou com sistemas que possuam comportamentos altamente não lineares, onde os métodos de controle tradicionais podem não ser suficientemente robustos.

Um exemplo desses métodos é o controle por lógica fuzzy, que lida com a incerteza e a imprecisão de maneira similar à lógica humana, e tem sido aplicado com sucesso em várias áreas, desde a engenharia de controle até a tomada de decisões econômicas

(ZADEH, 1992). Outro exemplo são as redes neurais artificiais, que imitam a maneira como o cérebro humano processa informações para aprender a controlar sistemas complexos (HAYKIN, 1999).

Em suma, o controle inteligente promete avanços significativos na engenharia de controle, tornando possível o controle eficaz de sistemas que até agora têm se mostrado resistentes aos métodos tradicionais.

Sempre existiram processos altamente complexos, que são fundamentos na incerteza das informações. Nessas circunstâncias, a estratégia adotada frequentemente se baseia na imprecisão e é geralmente expressa em termos linguísticos. No entanto, a partir dos dados operacionais de um sistema, é possível extrair informações e, por conseguinte, a manipulação dessas informações pode ser realizada por meio de técnicas de identificação e modelagem (PASSINO; YURKO-VICH, 1997).

A humanidade é capaz de resolver uma variedade de problemas utilizando métodos fundamentados no processo heurístico, que denotam flexibilidade e adaptabilidade (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006).

A palavra "heurística", de origem grega, significa "descoberta". Assim, esses métodos são fundamentados na experiência, regras de ouro (reciprocidade) e conceitos racionais (KASABOV, 1996). Em tal contexto, as heurísticas dependem mais do senso comum do que da matemática, e se mostram convenientes quando uma busca exaustiva é requerida para encontrar uma solução ótima, isto é, quando essa busca não é viável em termos de tempo. Soluções do tipo, embora não garantam a melhor solução, proporcionam um atalho em relação ao custo e tempo (KASABOV, 1996).

Neste artigo, baseando-se em um processo de fermentação alcoólica proposto inicialmente por Maher (1995), é discutida a construção de um sistema de controle a partir de um PID (controlador Proporcional, Integral, Derivativo) adaptativo com FCM (*Fuzzy Cognitive Maps*) (FCM-PID), e sua comparação com outros tipos de controladores. Destacam-se um PID clássico ajustado de forma híbrida, inicialmente pelo método de Ziegler-Nichols e posteriormente de maneira empírica a partir da análise do processo, e um PID adaptado com valores de um sistema Fuzzy (Fuzzy-PID) baseados nas relações anteriormente estabelecidas no FCM. Um exemplo de arquitetura clássica de controle supervisório pode ser encontrado no trabalho de Passino e Yurkovich (1997).

No processo em análise, a função do PID é regular a abertura e/ou fechamento das válvulas de entrada (Fin) e de saída (Fout). A componente adaptativa do controlador, seja com Fuzzy ou com FCM, Atua exclusivamente na válvula de saída. A primeira válvula é responsável pelo fluxo de substrato inserido no tanque e a segunda pelo fluxo de produto fermentado retirado do tanque, sendo que os controladores clássicos são similares aos utilizados no trabalho de Mendonça (2013).

Os mecanismos de ajuste propostos, Fuzzy e FCM, baseados nos erros em regime, derivativo e integral, transmitem os parâmetros de ganho proporcional e derivativo (Kp e

Kd) para o controlador PID previamente ajustado, enquanto o ganho integral (Ki) é mantido original por razões de projeto. Tanto a lógica Fuzzy quanto o uso de FCM no PID podem oferecer soluções eficientes para o problema abordado, visto que proporcionam maior facilidade para o desenvolvimento de um conjunto de regras heurísticas, explicitamente utilizadas nesses tipos de sistemas.

A partir das equações descritivas do processo de fermentação alcoólica, o sistema foi simulado no software MatLab utilizando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para sua resolução.

2 | TRABALHOS CORRELATOS

Os *Fuzzy Cognitive Maps* (FCMs) são usados em diversas disciplinas devido à sua flexibilidade e capacidade de modelar sistemas complexos.

Em medicina e saúde, os FCMs foram usados para modelar a progressão de doenças e auxiliar na tomada de decisões clínicas. Papageorgiou et al. (2011) utilizaram FCMs para modelar a progressão da doença de Alzheimer e determinar a eficácia de diferentes intervenções terapêuticas.

No campo da engenharia de controle e automação, os FCMs foram aplicados para melhorar a performance e robustez dos sistemas. Os trabalhos de Song e Chong (2013) e Wei et al. (2016) exemplificam o uso de FCMs em sistemas de controle fuzzy.

Na área ambiental, os FCMs foram utilizados na avaliação dos impactos de políticas de gestão de recursos. Kumar e Gohil (2015) usaram FCMs para avaliar os efeitos das políticas de gestão da água na Índia.

Esses são apenas alguns exemplos do uso dos FCMs nas últimas décadas, demonstrando sua versatilidade e utilidade em diferentes campos.

Trabalhos anteriores usaram técnicas Fuzzy, DCN (*Dynamic Cognitive Networks*) e FCM para uso em controladores PID adaptativos nos mais diversos processos.

Na dissertação de Ferreira (2009), comparou-se técnicas de controle Fuzzy, PI (controlador Proporcional Integral) e controle adaptativo em um processo de fabricação de papel reciclado.

No trabalho Wang e colaboradores (2012) são apresentados ganhos em controle de energia em elevadores com sistema Fuzzy-PID.

Lima e colaborador (2015) propuseram um controlador Fuzzy robusto implementado para visualização e controle de um processo térmico. Nele, um algoritmo FCM de agrupamento estima os parâmetros anteriores do sistema e o número de regras de um modelo Fuzzy do tipo Takagi-Sugeno.

Yesil e diferentes colaboradores (2013) apresentam dois artigos: o primeiro com um controlador Fuzzy-PID auto sintonizador (*Self-tuning*) baseados em apoderamento online das regras. O segundo apresenta um FCM para a sintonia dos parâmetros de controladores

PI aplicado a um sistema não linear. Esses controladores não conseguem resultados satisfatórios o suficiente nesse tipo de sistema, pela diferença em suas propriedades estáticas e dinâmicas.

No trabalho de Mendonça (2013), uma DCN apresenta uma evolução dos FCMs, dentre outras propostas conhecidas na literatura (PAPAGEORGIOU, 2014) para controle e sistema supervisório do processo do fermentador alcoólico proposto por Maher (1995), similar ao utilizado neste artigo. Neste trabalho, a DCN enviou setpoints para PIDs das válvulas do fermentador e implementou algumas funções de um sistema supervisório, como por exemplo a detecção de baixo nível de biomassa.

O trabalho de Wang e colaboradores (2012) aplica um controlador Fuzzy-PID para elevadores, com o objetivo de reduzir o grande consumo de energia, onde esse sistema de controle é necessário, pois o PI convencional não satisfaz eficientemente o controle de objetos não lineares.

3 | BACKGROUND PID, FUZZY E FCM

Os controladores pid são amplamente utilizados na indústria atual, com a maioria dos controladores industriais sendo baseados em pid ou variações deste. estes controladores são tipicamente ajustados de acordo com diversas regras descritas na literatura (OGATA, 2010).

por outro lado, a lógica fuzzy, desenvolvida por Lotfi A. Zadeh na década de 60 (ZADEH, 1965), trouxe uma nova dimensão ao campo do controle. neste trabalho, o foco recai sobre o modelo de controle fuzzy Mamdani, proposto por Ebrahim Mamdani em 1975 (PASSINO; YURKOVICH, 1998). um sistema de controle fuzzy, através de um conjunto de regras, simula o conhecimento de um especialista no processo, aplicando condições baseadas em termos linguísticos associados às variáveis de entrada e saída do processo (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006).

Especificamente, os FCMs têm sido aplicados em sistemas sociais, modelagem e tomada de decisão em ambientes corporativos e e-commerce. Além de auxiliar na tomada de decisões e diagnóstico na área médica, navegação robótica autônoma, controle de processos industriais (PAPAGEORGIOU, 2014), e previsão de séries temporais (HOMENDA; PEDRYCKZ, 2014), ARRUDA et al., 2016), dentre outras áreas.

4 | PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

De acordo com a seção 1, o processo de fermentação alcoólica utilizado neste artigo foi retirado da proposta inicial de Maher (1995). Dois fermentadores reais podem ser vistos na figura 1.

Figura 1. Tanques de fermentação alcoólica reais

O processo tem quatro variáveis de estado, sendo elas: as concentrações (em g/l) de substrato (S), de biomassa (C), de produto (P) e o volume (em litros) (V) do tanque onde ocorre a fermentação.
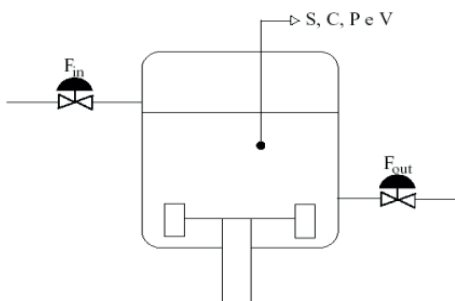
Figura 2. Esquemático do tanque de fermentação alcoólica

A figura 2 mostra o sistema do tanque analisado, com as válvulas de entrada (Fin) e saída (Fout), sendo a primeira responsável pelo fluxo de substrato inserido no tanque e a segunda pelo fluxo de produto fermentado retirado da cuba.

Destaca-se nesse processo a grande correlação entre as variáveis mencionadas acima, resultando em um sistema não-linear. A figura 3 mostra a resposta do sistema a um degrau linear.

Analisando a figura 3, nota-se um comportamento de fase não-mínima, assim como um tempo de acomodação elevado (MENDONÇA, 2013).

Outros fatores devem ser considerados, como o volume máximo de 4,75 l e mínimo de 1 l, por questões de segurança.

Além disso, para garantir a fermentação, a concentração de biomassa do sistema não deve exceder 8 g/l, enquanto o substrato deve manter-se sempre acima de 0,5 g/l, caso contrário a reação acabaria. Outra restrição é a faixa de valores do setpoint para

a concentração de produto, na faixa discreta de 10 a 50 g/l, de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Mendonça (2013).
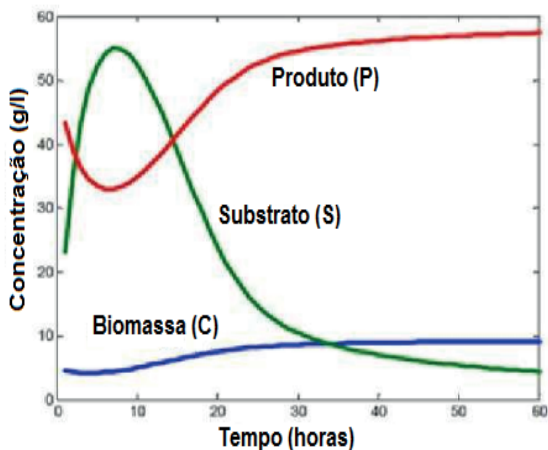
Figura 3– Resposta ao degrau das variáveis de estado da fermentação alcoólica

As equações diferenciais que descrevem a dinâmica do processo são mostradas em (1), (2), (3) e (4).

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_c/s}\mu C + \frac{Fin}{V}Sa - \frac{Fout}{V}S \qquad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \mu C - \frac{Fout}{V}S \qquad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{Y_p/s}{Y_c/s}\mu C - \frac{Fout}{V}P \qquad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = Fin - Fout \qquad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{S}{K_s + S_s}\left(1 - \frac{P}{P_m}\right) \qquad (5)$$

Sendo:

Sa: concentração de substrato da alimentação;

Yc/s: constante de conversão da biomassa;

Yp/s: constante de conversão do produto;

μ: função de crescimento da biomassa, dada por (5).

μ_0: máxima taxa de crescimento;

Ks: constante de Michaelis-Menton;

Pm: coeficiente de inibição do produto durante a reação.

Os valores iniciais das variáveis de estado são: S=4,5 g/l, C=5 g/l, P=50 g/l e V=2 l. Já as constantes admitidas do processo são: Sa = 100 g/l, Pm = 100, Ks = 10, $\mu 0$ = 0,31, Yc/s = 0,44 e Yp/s = 0,07.

A partir das equações (1), (2), (3) e (4), nota-se a forte correlação entre as variáveis de modo que μC encontra-se tanto em (1) quanto em (2), por exemplo. Observa-se a fase não-mínima do sistema de equações por meio dos zeros presentes nelas, deixando a fases do sistema mais negativas.

Serão realizados dois tipos de controle no fermentador analisado: o primeiro é um seguidor de setpoint (para o produto), e o outro é um controle de faixa para o volume e o substrato, de acordo com as especificações dadas na seção 4.

5 I SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO POR FUZZY E FCM

Como abordado na seção 1, nesse trabalho será feita a comparação entre dois tipos de mecanismos de ajuste de controle adaptativo PID: a primeira usando lógica Fuzzy e a segunda utilizando FCM. Ambas recebem o valor dos seguintes erros: da janela anterior (Erro(k)), erro derivativo (Differro) e erro integral (Interro). Com eles, esses mecanismos de ajuste modificam os valores dos ganhos Kp e Kd de modo a controlar o sistema dentro das especificações desejadas.

Foram criadas duas campanhas diferentes para observar as reações do processo em diferentes cenários. A primeira possui variações mais amenas do setpoint, enquanto na segunda elas são maiores.
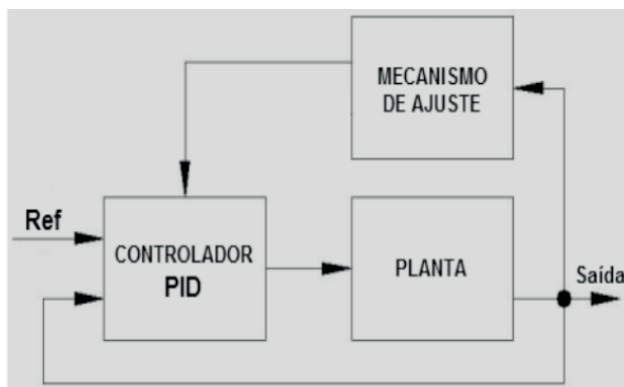
Figura 4. Esquemático do controle do processo

A figura 4 mostra o esquemático utilizado para o controle do processo, baseado na dissertação de Ferreira (2009), que traz uma abordagem de sistema adaptativo por modelo de referência, um método onde as regras de ajuste indicam como os parâmetros

do controlador devem ser ajustados (FERREIRA, 2009).

Nesse caso, os erros de saída retornam ao mecanismo de ajuste (FCM ou Fuzzy), para que sejam ajustados os ganhos Kp e Kd do PID.

Os pesos (W) do FCM foram ajustados heuristicamente até o desejado por uma lógica simplista: as variações individuais de Erro(k),

Nesse caso, os erros de saída retornam ao mecanismo de ajuste (FCM ou Fuzzy), para que sejam ajustados os ganhos Kp e Kd do PID.

Os pesos (W) do FCM foram ajustados heuristicamente até o desejado por uma lógica simplista: as variações individuais de Erro(k), Differro e Interro afetam inversamente os ganhos Kp e Kd, conforme mostra a figura 5.
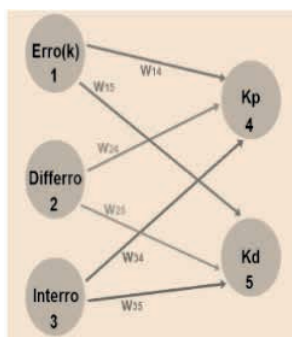
Figura 5. FCM utilizado

Essa heurística de ajuste foi obtida por meio de observação do comportamento dinâmico do processo inspirada no método de sintonia de Ziegler-Nichols.

Nota-se que o ganho integral não foi modificado pelo FCM, devido à má influência dele sobre os resultados. Os Valores utilizados nos pesos são: W14 = W24 = W15 = -0,8, W34 = -0,85, W25 = W35 = -0,75.

A base de regras utilizadas para o mecanismo Fuzzy foi fundada na estrutura do FCM, e algumas são mostradas a seguir:

1. Se erro(k) é pequeno então Kp é grande;
2. Se erro(k) é médio então Kp é médio;
3. Se erro(k) é pequeno então Kd é grande;
4. Se erro(k) é médio então Kd é médio.

A superfície Fuzzy encontrada é mostrada na figura 6. Nela, pode-se observar o caráter não-linear do processo de fermentação.
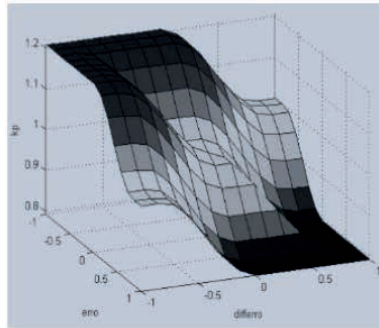
Figura 6. Superfície Fuzzy

6 I RESULTADOS

Para a comparação dos resultados foi utilizado como referência a integral do erro absoluto (ITAE) e a integral do erro quadrático (ISE) na concentração do produto nas duas campanhas. Esses erros são comumente usados para análise de resultados na área de controle, como visto nos trabalhos de Maurya e colaboradores (2015), entre outros.

Os resultados obtidos nas figuras 7 até 14 mostraram que os dois controladores tiveram resultados satisfatórios, pois mantiveram as variáveis volume e substrato dentro das faixas propostas no controle. Entretanto, a principal variável controlada (produto), uma seguidora de setpoint, de acordo com a campanha objetivada pode ser conferido pelo ITAE e ISE na tabela 1.

Para investigação da robustez dos controladores, a segunda campanha foi gerada com um leve ruído branco nas válvulas da ordem de 5%. Os resultados apontaram ligeira vantagem das duas propostas de mecanismos de ajuste em relação ao controlador clássico PID.

Em relação à resposta ao degrau, como pode-se observar tabela 2, os dois mecanismos de ajuste apresentados tiveram um overshoot pequeno, diferindo no tempo de acomodação inicial, que foi substancialmente menor no FCM-PID.

Com a análise dos resultados, e ponderando os fatores de forma heurística, tem-se que o controlador FCM-PID obteve melhores resultados considerando as duas campanhas propostas, principalmente devido ao fato do controlador Fuzzy-PID ser ajustado exclusivamente para cada campanha, enquanto o FCM-PID foi ajustado uma única vez, provando sua versatilidade. O comparativo dos erros pode ser visto na tabela 1. E, finalmente, a atuação da sintonia adaptativa para os parâmetros Kp e Kd tiveram suas ações mostradas nas figuras 8, 10, 12 e 14 e as ações de sintonia foram perceptíveis no início de cada campanha e no distúrbio provocado pela mudança de setpoint.

	Campanha 1	
	ITAE	ISE
PID Clássico	0,9324	0,0557
Fuzzy-PID	0,9008	0,0534
FCM-PID	0,7502	0,0539

Tabela 1. Comparativo dos erros

	Máximo *Overshoot* (%)	Tempo de acomodação (h)
PID Clássico	7,3224	15
Fuzzy-PID	3,8655	20
FCM-PID	6,7471	15

Tabela 2. Comparativo da resposta ao degrau

Abaixo, seguem os resultados obtidos para cada mecanismo de ajuste da arquitetura e suas respectivas campanhas.
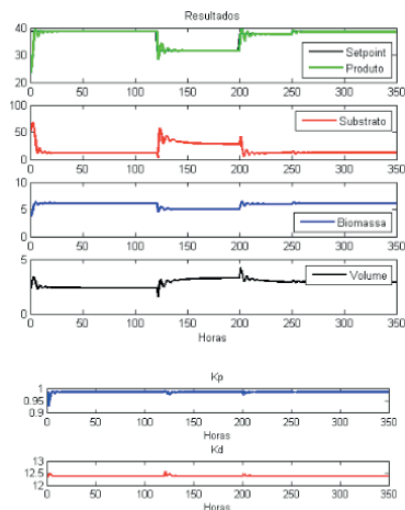
Figura 7. Resultados do Fuzzy-PID para a campanha 1
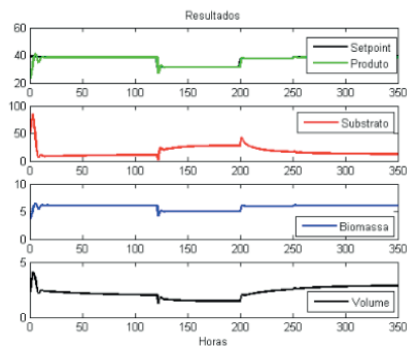
Figura 8. Ganhos do Fuzzy-PID para a campanha 1
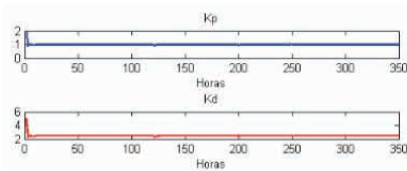
Figura 9. Resultados do FCM-PID para a campanha 1

7 I CONCLUSÃO

Neste artigo, foram exploradas duas técnicas computacionais inteligentes, a lógica Fuzzy clássica e os Fuzzy Cognitive Maps (FCM), para ajustar uma arquitetura adaptativa em um processo de fermentação alcoólica. Os resultados obtidos confirmaram a natureza não-linear e de fase não mínima do processo, além de mostrar uma correlação significativa entre as variáveis de estado. Para avaliar o desempenho dos controladores propostos, foram realizadas duas campanhas de fermentação distintas, e os resultados foram consistentes, demonstrando a robustez dos controladores mesmo diante de ruído nas válvulas. Como direções para pesquisas futuras, sugere-se a implementação de um controlador Fuzzy e/ou Dynamic-Fuzzy Cognitive Maps, que permita a ajuste dinâmico das relações causais para controlar as válvulas e funções de um sistema supervisor. Essas melhorias podem resultar em avanços no controle do processo e no aprimoramento geral do desempenho.

REFERÊNCIAS

ARRUDA, L. V. R.; MENDONÇA, M.; NEVES, F.; CHRUN, I. R. e PAPAGEORGIOU, E. I. “Artificial life environment modeled by dynamic fuzzy cognitive maps”. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2016.

FERREIRA, C. “Estudo comparativo entre as técnicas de controle Fuzzy, PI e adaptativo aplicado ao processo de fabricação de papel reciclado utilizando a ferramenta delta tune”. Dissertação (Curso de pós-graduação em engenharia elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, 2009.

KASABOV, N. K. “Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering”. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1996.

KOSKO, B. “Fuzzy cognitive maps”. Int. J. Man Mach Stud, 1986.

LIMA, F. e SERRA, G. “Fuzzy PID controller multiobjective genetic design”. In: 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Auckland, 2015.

MAHER, M. “Modélisation elaboration estimation et de commander: application à um bioprocédé”. Tese - Université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, Toulouse, 1995.

MAURYA, A. K; BONGULWAR, M. R. e PATRE, B. M. “Tuning of fractional order PID controller for higher order process based on ITAE minimization”. In: 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi, 2015.

MENDONÇA, M.; ANGELICO, B.; ARRUDA, L. V. R. e F. NEVES JR. “A dynamic fuzzy cognitive map applied to chemical process supervision”. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 26, n. 4, p. 1199-1210, 2013.

OGATA, K. “Modern Control Engineering”. 5ª ed. Prentice Hall, New Jersey, 2010.

PAPAGEORGIOU, E. I. “Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering from Fundamentals to Extensions and Learning Algorithms”. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.

PASSINO, M. K. e YURKOVICH, S. “Fuzzy control”. Addison-Wesley, Menlo Park.

WANG, R.; LUO, F.; HUANG, X. e LI, P. “New elevator energy feedback control system design based on fuzzy PID controller”. In: Power Engineering and Automation Conference (PEAM), IEEE, 2012.

YESIL, E.; KUMBASAR, T.; KARASAKAL, O. “Self-tuning interval type-2 fuzzy PID controllers based on online rule weighting”. In: 2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Hyderabad, 2013.

ZADEH, L. A. “An introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems”. Kluwer Academic Publisher, Boston, 1992.

ZHOU, D.; QIAN, C.; WEI, Q. “Adaptive learning control of nonlinear systems with unknown dead-zone inputs”. Information Sciences, v. 372, p. 380–391, 2016.

LILIAN COELHO DE FREITAS - Possui graduação em Engenharia da Computação pela Universidade Federal do Pará (UFPA), obtida em 2007. Possui mestrado em Computação Aplicada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFPA, obtido em 2009. Em 2008, realizou estágio de mestrado no Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC/Porto - Portugal). Atuou como pesquisadora membro do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA/UFPA) de 2004 a 2014 e do Laboratório de Sensores e Sistemas Embarcados (LASSE/UFPA) de 2008 a 2012. Atuou como Pesquisadora Visitante no *Georgia Institute of Technology* (Atlanta, Georgia, Estados Unidos), no período de Março/2012 a Fev/2013. Desde 2016 atua como professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) na área de Informática. Desde 2020 é membro do Conselho Editorial da editora Atena. Tem diversos trabalhos científicos publicados, envolvendo publicações em livros, revistas e eventos científicos. Seus interesses de pesquisa são: telecomunicações (comunicações sem fio e rádio cognitivo), *machine learning* e educação.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Amplificador operacional 31, 34

Aprendizagem de máquinas 9

Aterramento 50, 51

C

Controlador PID 77

Controle inteligente 77, 78

Controle Inteligente 77

E

Eficiência 19, 24, 52, 56, 59, 60, 64, 65, 66, 70, 72, 73

Energia elétrica 10, 19, 51, 52, 53, 57, 65, 70, 71, 72, 73

Energias renováveis 65, 66, 67, 68, 69, 70, 73

G

Gerador 51, 71, 72, 73

I

Iluminância 31, 32, 33, 35, 44, 49

Isolador 1, 5

L

Linhas de transporte 1, 3

Luminária 31, 32, 38, 44, 47, 48

M

Mapas Cognitivos Fuzzy 76, 77

N

NBR/ISO 31, 32

O

Off Grid 50, 51, 58

P

Processamento de fala 9

Processo de fermentação alcoólica 77, 78, 79, 80, 87

R

Reconhecimento de fala 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28

INNOVATE:
ENGENHARIA ELÉTRICA
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br
Atena
Editora
Ano 2023